



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de modelos para análise estrutural do quadro tubular de uma bicicleta pelo método dos elementos finitos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Development of models for the structural analysis of a bicycle tubular frame by the finite element method

Autor

André Silva Jacinto

Orientadores

Marta Cristina Cardoso de Oliveira

Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente	Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Julho, 2016

An expert is someone who tells you why you can't do something.

Sir Alec Issigonis

Aos meus pais, irmãos e avós.

Agradecimentos

O meu caminho académico jamais seria possível sem o grande contributo, sacrifício e apoio de toda a família, destacando os meus pais, irmãos e avós, a quem dedico a tese, por terem dado tudo o que podiam, e por vezes o que não podiam, para que conseguisse completar este ciclo. Um agradecimento, por mais profundo que seja, não é suficiente para demonstrar o quão grato estou por tudo o que fizeram por mim, não só ao longo destes cinco anos, como desde a data do meu nascimento.

Quero agradecer todo o suporte, conforto e carinho dado pela minha namorada ao longo destes dois anos, assim como paciência para aguentar os meus dias menos bons, quando por vezes já é difícil de o fazer nos dias normais.

Na reta final deste ciclo, os maiores agradecimentos vão para os meus orientadores, a Professora Marta Oliveira e o Professor Altino Loureiro, pela forma como me apoiaram, aconselharam, prepararam e motivaram ao longo da realização de todo o trabalho. Da mesma forma, tenho que agradecer a todo o pessoal da sala de investigação, por conseguirem manter um ambiente leve e descontraído no que esperava que fossem longos e entediados dias de trabalho árduo.

Deve ser feito um agradecimento a todos os docentes da Escola Secundária de Raúl Proença com quem me cruzei, estabelecimento este que me preparou da melhor forma possível para o “próximo nível”, tanto no âmbito escolar como pessoal. Este agradecimento vai especialmente para a professora Carla Coutinho, responsável pelas sucessivas chamadas de atenção e conselhos que me fizeram mudar drasticamente de atitude e proporcionaram um crescimento aos mais diversos níveis.

Agradeço, também, a todas as amigas próximas e verdadeiras que a minha estadia por Coimbra veio a proporcionar, assim como às que já vinham de longa data e que resistiram a esta etapa. Sem a força que me forneceram, dificilmente seria capaz de

ultrapassar os momentos mais baixos, e nas alturas de alegria, estiveram sempre presentes para fosse partilhada. Deram a esta fase da minha vida um significado especial, que será guardado com muito carinho na minha memória.

Aos alunos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, pela atitude de entreatuda, assim como ao corpo docente e não docente pela forma como se mantém próxima dos seus alunos, proporcionando um ambiente que dificilmente pode ser igualado dentro do mesmo contexto, um grande obrigado.

À ABIMOTA, principalmente aos engenheiros Luís Pires e Paulo Pires, agradeço a disponibilidade que tiveram ao receber-me e a atenção despendida ao longo de toda a realização do trabalho.

À Triangle's, um agradecimento pelo estabelecimento da colaboração com Departamento de Engenharia Mecânica, que constituiu a motivação para este trabalho e pelo fornecimento dos dados.

Resumo

Atualmente, as bicicletas apresentam-se como um meio de transporte cómodo, eficiente e sustentável. O componente estrutural essencial de uma bicicleta é o quadro, que para ser validado tem que cumprir os requisitos de segurança estabelecidos pelas normas, que se traduzem por diversos ensaios que simulam os mais variados tipos de solicitações.

O principal objetivo deste trabalho é averiguar a viabilidade da utilização de procedimentos numéricos para a realização dos ensaios previsto na norma ISO 4210. A análise de viabilidade toma em conta as características específicas dos ensaios, bem como os aspetos relacionados com o desempenho computacional dos programas atualmente disponíveis. Neste contexto, considerou-se como referência um quadro, cujas dimensões foram fornecidas pela empresa *Triangle's*, produzido numa liga de alumínio.

Neste trabalho foram construídos os modelos numéricos dos ensaios, de acordo com as imposições descritas na norma ISO 4210, com o auxílio de dois programas cujo funcionamento se dá em conjunto: o *Autodesk® Inventor™*, para a modelação, e o *Autodesk® Simulation Mechanical™* para a análise pelo método dos elementos finitos. A construção dos modelos teve por base a interpretação cuidada da norma.

A realização deste trabalho permitiu identificar um conjunto de dificuldades associadas: (i) à preparação dos ficheiros em ambiente CAD, devido à utilização de ficheiros genéricos para a definição da geometria; (ii) à geração de malha de elementos finitos, devido ao elevado número de elementos necessários para descrever corretamente os detalhes geométricos do modelo, o que resulta em tempos de computação elevados; (iii) aos requisitos de *hardware*, uma vez que os modelos também se caracterizam por apresentarem diferentes tipos de não linearidades, que contribuem para originar problemas de convergência. Apesar destas dificuldades, a simulação numérica do ensaio de impacto de massa em queda livre, permitiu evidenciar a importância da dimensão da forqueta e das propriedades mecânicas do material do quadro, no desempenho estrutural do quadro.

Palavras-chave: Quadro de bicicleta, Norma ISO 4210, Simulação numérica, Método dos elementos finitos, Análise dinâmica, Liga de alumínio 6061.

Abstract

Nowadays, bicycles are a convenient, efficient and sustainable mean of transport. The essential structural component of a bicycle is the frame, which has to be validated to meet the safety requirements set by the standards, which are reflected by various tests that simulate different load cases.

The main objective of this study is to determine the feasibility of using numerical procedures for carrying out the tests required by the ISO 4210 standard. The feasibility analysis takes into account the specific characteristics of the tests, as well as the aspects related with the computational performance of the available software. In this context, an aluminium alloy frame with dimensions provided by the company *Triangle's* was considered as reference.

In this work, the numerical models of the different tests described in the ISO 4210 standard were constructed, with the aid of two interconnected programs: *Autodesk® Inventor™*, for modelling, and *Autodesk® Simulation Mechanical™*, to perform the analysis with the finite element method. The models were built based on a careful interpretation of the standard.

The work performed enabled the identification of some difficulties, related with: (i) the preparation of files in the CAD environment, due to the use of generic files for the definition of the frame geometry; (ii) the generation of the finite element meshes, due to the high number of elements needed to properly describe the geometric details of the model, which results in high computational times; (iii) the hardware requirements, since the models are also characterized by having different types of nonlinearities, which contribute to convergence problems. Despite these difficulties, the numerical simulation of the impact test, with a falling mass, has highlighted the importance of the dimension of the fork and the mechanical properties of the material of the frame, in the structural performance of the frame.

Keywords Bicycle frame, ISO 4210 standard, Numerical simulation, Finite element method, Dynamic analysis, Aluminium alloy 6061.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.1. Objetivos e guia de leitura	1
2. CONDIÇÕES DE ENSAIO: NORMA ISO 4210.....	3
2.1. Ensaio de impacto de massa em queda livre.....	4
2.2. Ensaio de impacto de quadro em queda.....	5
2.3. Ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar	7
2.4. Ensaio de fadiga com forças horizontais	9
2.5. Ensaio de fadiga com uma força vertical.....	10
3. MODELAÇÃO DOS ENSAIOS.....	13
3.1. Ensaio de impacto de massa em queda livre.....	17
3.2. Ensaio de impacto de quadro em queda.....	20
3.3. Ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar	23
3.4. Ensaio de fadiga com forças horizontais	26
3.5. Ensaio de fadiga com uma força vertical.....	27
4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	29
4.1. <i>Autodesk Simulation Mechanical</i>	29
4.2. Modelos numéricos.....	31
4.2.1. Ensaio de impacto – massa em queda livre	32
4.2.2. Ensaio de impacto – quadro em queda	36
4.3. Resultados numéricos	41
4.3.1. Ensaio de impacto de massa em queda.....	42
4.3.2. Ensaio de impacto de quadro em queda	49
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Elementos constituintes de um quadro de bicicleta (adaptado de [1]).	3
Figura 2.2. Ensaio estático da norma DIN 79100.	4
Figura 2.3. Montagem do quadro e forqueta dianteira num ensaio de impacto de massa em queda.	5
Figura 2.4. Montagem do quadro e forqueta dianteira num ensaio de impacto de quadro em queda.	6
Figura 2.5. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar.	8
Figura 2.6. Pormenor das distâncias (em milímetros) e pontos de aplicação das forças no adaptador da pedaleira, de acordo com a norma.	8
Figura 2.7. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com forças horizontais.	9
Figura 2.8. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com uma força vertical.	10
Figura 3.1. Erro na geração de um objeto sólido a partir de uma superfície 3D.	13
Figura 3.2. Dimensões características de uma forqueta [6].	14
Figura 3.3. Forqueta de testes e respetivas dimensões.	15
Figura 3.4. Ensaio estático da forqueta de testes.	16
Figura 3.5. Valores da deflexão δ obtidos no ensaio estático da forqueta.	16
Figura 3.6. (a) Massa de impacto e respetivas dimensões, (b) Rolo da forqueta dianteira e respetivas dimensões.	18
Figura 3.7. Conjunto da forqueta dianteira e elemento de ligação do rolo à forqueta.	18
Figura 3.8. Alinhamento dos eixos dianteiro e traseiro na direção vertical.	19
Figura 3.9. (a) Aspeto final do modelo para o ensaio de impacto – massa em queda livre, (b) Modelação da situação inicial do ensaio, com a massa assente em repouso no rolo da forqueta dianteira.	19
Figura 3.10. Medição do ângulo do <i>seat tube</i> em relação à direção vertical.	20
Figura 3.11. (a) Massa M_1 e respetivas dimensões, (b) Massa M_2 e respetivas dimensões.	21
Figura 3.12. (a) Dimensões da massa M_3 e detalhe da zona de fixação no <i>bottom bracket</i> , (b) bloco de aço e respetivas dimensões.	22
Figura 3.13. Dimensões do eixo traseiro e detalhe dos <i>dropouts</i> .	22
Figura 3.14. Suporte do eixo traseiro e respetivas dimensões.	22

Figura 3.15. (a) Aspeto final do modelo para o ensaio de impacto – quadro em queda, (b) Modelação da situação inicial do ensaio, com o rolo da forqueta dianteira assente em repouso no bloco de aço.	23
Figura 3.16. (a) Apoio dianteiro e respetivas dimensões, em milímetros; (b) esfera e respetivo diâmetro, em milímetros.	24
Figura 3.17. (a) Apoio traseiro e respetivas dimensões, em milímetros; (b) adaptador da pedaleira e respetivas dimensões, em milímetros.	24
Figura 3.18. Tirante e respetivas dimensões, em milímetros.	25
Figura 3.19. Pormenor da distância entre os planos médios do quadro e do tirante.	26
Figura 3.20. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com forças exercidas ao pedalar.	26
Figura 3.21. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com forças horizontais.	27
Figura 3.22. (a) Espigão e respetivas dimensões, em milímetros; (b) extensão horizontal, respetivas dimensões em milímetros e ângulo do espigão com o plano horizontal.	28
Figura 3.23. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com uma força vertical.	28
Figura 4.1. (a) Separação entre os <i>dropouts</i> e os elementos estruturais a que deviam estar ligados, (b) problema de contacto responsável pela separação entre os <i>dropouts</i> e os elementos estruturais a que deviam estar ligados.	30
Figura 4.2. Problema de contacto resolvido.	30
Figura 4.3. Ligação entre os <i>dropouts</i> e os restantes elementos do quadro. Detalhe da zona com problemas de ligação (assinalado com o círculo vermelho): (a) antes e (b) depois da reparação.	30
Figura 4.4. Curva tensão-deformação para a liga de alumínio 6061, com os tratamentos T4 e T6.	32
Figura 4.5. Condição de fronteira aplicada nos <i>dropouts</i> traseiros.	33
Figura 4.6. Condição de fronteira aplicada nos <i>dropouts</i> dianteiros.	33
Figura 4.7. Condição de fronteira aplicada à massa de impacto.	33
Figura 4.8. Contacto entre a massa de impacto e o rolo da forqueta.	34
Figura 4.9. Parâmetros relacionados com a: (a) duração da simulação, (b) gravidade.	35
Figura 4.10. Parâmetros relacionados com o carregamento.	35
Figura 4.11. Afastamento entre o <i>dropout</i> e eixo traseiro devido ao impacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço.	37
Figura 4.12. Condição de fronteira aplicada aos suportes do eixo traseiro.	37
Figura 4.13. Definição do tipo de contacto entre o eixo traseiro e os seus suportes.	38
Figura 4.14. Condição de fronteira aplicada ao eixo traseiro.	38
Figura 4.15. Condição de fronteira aplicada ao bloco de aço.	39

Figura 4.16. Definição do tipo de contacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço.	39
Figura 4.17. Definição do deslocamento prescrito: (a) seleção da superfície e (b) da curva de aplicação.	40
Figura 4.18. Definição das condições de ativação da aceleração da gravidade.	40
Figura 4.19. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ (a) e força nodal máxima exercida pela massa no rolo da forqueta (b).	42
Figura 4.20. Malha gerada no rolo da forqueta inicial (a) e final (b).	43
Figura 4.21. Tensão equivalente (von Mises) exercida no quadro, com a forqueta inicial (a) e com a forqueta final (b).	45
Figura 4.22. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ (a) e informações relativas às simulações numéricas (b).	46
Figura 4.23. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ para a liga com o tratamento térmico T4 (a) e vista pormenorizada do mesmo deslocamento (b). ..	46
Figura 4.24. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ para a liga com o tratamento térmico T6 (a) e vista pormenorizada do mesmo deslocamento (b). ..	47
Figura 4.25. Distribuição da tensão de von Mises no quadro, para o instante correspondente ao primeiro impacto, incluindo detalhe da zona onde ocorre o valor máximo.	48
Figura 4.26. Distribuição da tensão de von Mises na zona onde ocorre o valor máximo, para o instante correspondente ao final do ensaio.	49
Figura 4.27. Distribuição da tensão de von Mises (MPa) no quadro, para o instante correspondente: (a) ao final do ensaio estático; (b) ao primeiro impacto do ensaio dinâmico, ambos para um material com comportamento linear elástico; (c) ao primeiro impacto do ensaio dinâmico, para o quadro da liga 6061-T6.	50
Figura 4.28. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos XX para um material linear elástico (a) e para um material elastoplástico (liga 6061-T6) (b).	50
Figura 4.29. Malha gerada no rolo da forqueta e no bloco de aço: (a) ensaio estático (b) ensaio dinâmico.	51
Figura 4.30. Evolução do incremento de tempo ao longo do ensaio dinâmico para o quadro com: (a) material linear elástico e (b) material elastoplástico (6061-T6).	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Propriedades elásticas e plásticas da liga de alumínio 6061.....	32
Tabela 4.2 Especificações dos computadores utilizados nas simulações numéricas.	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

δ – Deflexão da forqueta

ν - Coeficiente de Poisson

ρ – Densidade

σ_y - Tensão limite de elasticidade

a - aceleração

C_1 – Número de ciclos de carga aplicados no ensaio de fadiga com forças horizontais

D – Distância da extremidade do quadro ao centro de gravidade da massa M_1

D_{ra} – Razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de fadiga

D_{rb} – Razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de impacto

E - Módulo de elasticidade

F - Força

F_1 – Forças aplicadas no ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar

F_2, F_3 – Forças aplicadas no ensaio de fadiga com forças horizontais

F_4 – Forças aplicada no ensaio de fadiga com uma força vertical

h_1 – Distância entre a massa de impacto e o rolo da forqueta dianteira

h_2 – Distância entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço

h_3 – Distância entre o topo do *seat tube* e o ponto H

K - Parâmetro de encruamento

K_1 – Constante para o cálculo da razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de fadiga

K_2 – Constante para o cálculo da razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de impacto

L – Comprimento dos braços inclinados do adaptador da pedaleira

L_{ac} – Comprimento *axle to crown*

m - massa

M_1, M_2, M_3 – Massas utilizadas no ensaio de impacto – quadro em queda

R_c – Comprimento do braço vertical do adaptador da pedaleira

R_w – Altura correspondente ao raio do conjunto composto pelo pneu e pela jante

Siglas

ABIMOTA – Associação Nacional das Indústrias de Duas Rodas

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

DIN – Deutsches Institut für Normung

IGES – Initial Graphics Exchange Specification

ISO – International Organization for Standardization

MES – Mechanical Event Simulation

SI – International System of Units

1. ENQUADRAMENTO GERAL

Desde a sua invenção, em meados do século XIX, os velocípedes tornaram-se num meio de transporte bastante comum no quotidiano. É principalmente popular entre os mais jovens que não têm ainda possibilidade de conduzir veículos motorizados, mas também muito utilizados por quem tem que fazer deslocações diárias bastante curtas, ou mesmo quem as usa somente como desporto. Nos dias de hoje, depois de um longo período de desenvolvimento, as bicicletas atuais apresentam-se como um meio de transporte cómodo e eficiente. Também os materiais tiveram um longo percurso de evolução, sendo os modelos primordiais feitos essencialmente em madeira, passando pelos tradicionais aços até chegar aos materiais mais modernos como alumínio, fibra de carbono ou até titânio.

Com toda esta preocupação relativamente aos mais diversos aspetos que visam o bom funcionamento destes veículos, surgiram diversas normas com a regulamentação que os fabricantes têm que cumprir com os seus produtos, onde se avalia a resposta dos diversos componentes de uma bicicleta às solicitações que poderão decorrer da sua utilização. Um destes componentes essenciais é o quadro que, dependendo do tipo de bicicleta em questão (de cidade, criança, estrada ou de montanha), terá que cumprir os requisitos estabelecidos pelas referidas normas, e que são traduzidos por diversos ensaios que simulam os mais variados tipos de solicitações.

1.1. Objetivos e guia de leitura

O principal objetivo deste trabalho passa por averiguar a viabilidade da utilização de procedimentos numéricos para a realização destes ensaios, tendo como base os ensaios experimentais que são correntemente utilizados. A análise de viabilidade toma em conta as características específicas dos ensaios, bem como os aspetos relacionados com o desempenho computacional dos programas atualmente disponíveis.

Na realização da análise de viabilidade considerou-se como referência um quadro, cujas dimensões foram fornecidas pela empresa Triangle's. Este corresponde a um quadro de bicicleta de montanha pelo que deve reunir algumas características como: o custo, que deve ser o menor possível; elevada resistência e rigidez; e peso reduzido. O quadro de

referência será produzido numa liga de alumínio pelo que detém algumas das características mencionadas, como peso reduzido e elevada rigidez. Porém, as ligas de alumínio são penalizadas em termos de resistência, face a materiais como alguns aços, as fibras de carbono e as ligas de titânio. Em termos de custo, as ligas de alumínio são penalizadas em relação aos aços convencionais, mas o mesmo não acontece em relação aos restantes materiais.

Neste trabalho foram construídos os modelos numéricos dos ensaios, com as diversas imposições descritas na norma ISO 4210, de modo a poder avaliar os esforços a que o quadro estará sujeito ao longo do seu período de vida útil. A modelação foi realizada com o auxílio de dois programas que funcionam em conjunto: o *Autodesk® Inventor™*, para a modelação, e o *Autodesk® Simulation Mechanical™*, para a análise pelo método dos elementos finitos.

Este documento está organizado em três capítulos. Neste primeiro capítulo serão explicados todos os fundamentos teóricos para a realização dos ensaios, fornecidos pela norma ISO 4210, assim como todos os procedimentos necessários para a obtenção de resultados. Serão também apresentados os detalhes referentes à etapa de modelação dos ensaios. O segundo capítulo descreve os modelos adotados na simulação numérica dos ensaios, incluindo os detalhes referentes às condições de fronteira. Neste capítulo são também discutidos os resultados obtidos. O último capítulo corresponde a um resumo das principais conclusões.

2. CONDIÇÕES DE ENSAIO: NORMA ISO 4210

Neste capítulo são descritas as normas relativas aos ensaios utilizados para a certificação dos quadros de bicicletas. Com base nessa descrição, são definidas as condições de ensaio necessárias para a sua modelação, incluindo componentes auxiliares. Para além disso, são descritas as condições de fronteira, parâmetros numéricos e condições de carga utilizados em cada ensaio.

O foco deste trabalho é um quadro de bicicleta de montanha, conforme ilustrado na Figura 2.1. Para facilitar tanto a compreensão na leitura como a escrita deste documento, optou-se por utilizar a designação inglesa das diversas partes que compõem o quadro, conforme ilustradas na Figura 2.1.

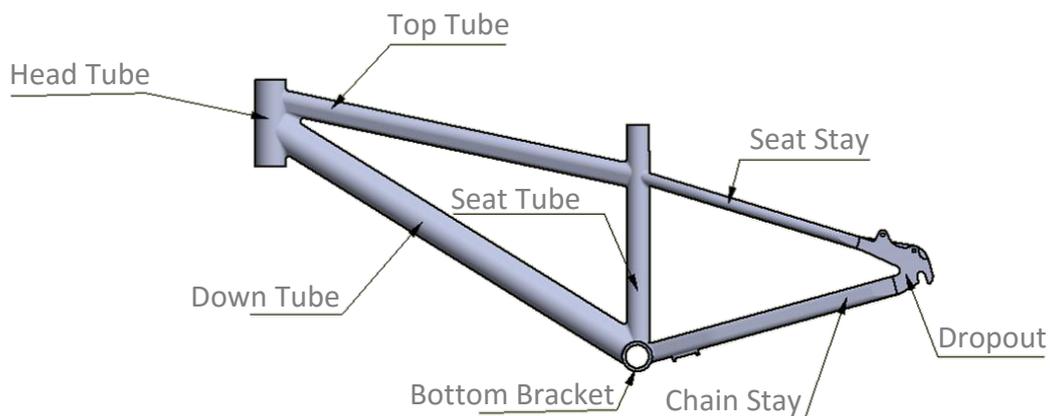


Figura 2.1. Elementos constituintes de um quadro de bicicleta (adaptado de [1]).

No decurso deste trabalho foram consultadas a norma DIN 79100 [2], que corresponde à definição do ensaio estático do quadro, e a ISO 4210 [3], que define os ensaios dinâmicos. Esta última norma atualmente substitui a primeira. De forma sucinta, o ensaio estático descrito na norma DIN 79100 consiste na montagem do quadro, conforme ilustrado na Figura 2.2, com a forqueta dianteira e um rolo de 50mm de diâmetro, podendo também ser montada a pedaleira. O quadro deve poder rodar em torno do seu eixo traseiro, e o rolo da forqueta dianteira deve estar assente sobre uma base, com uma superfície lisa. Deve ainda ser montado, no *seat tube*, uma massa com um valor de 300kg para os quadros de adulto, 180kg para quadros de criança, e 275kg para bicicletas dobráveis. O quadro permanece nesta

condição, de forma estática, durante 5 minutos. No fim, terá de cumprir os requisitos impostos: não existir deformação permanente superior a 12,5mm no quadro, ou 20mm no conjunto composto pelo quadro e pela forqueta; e não deve ser verificada qualquer tipo de fenda ou rotura, em qualquer ponto do quadro [2].

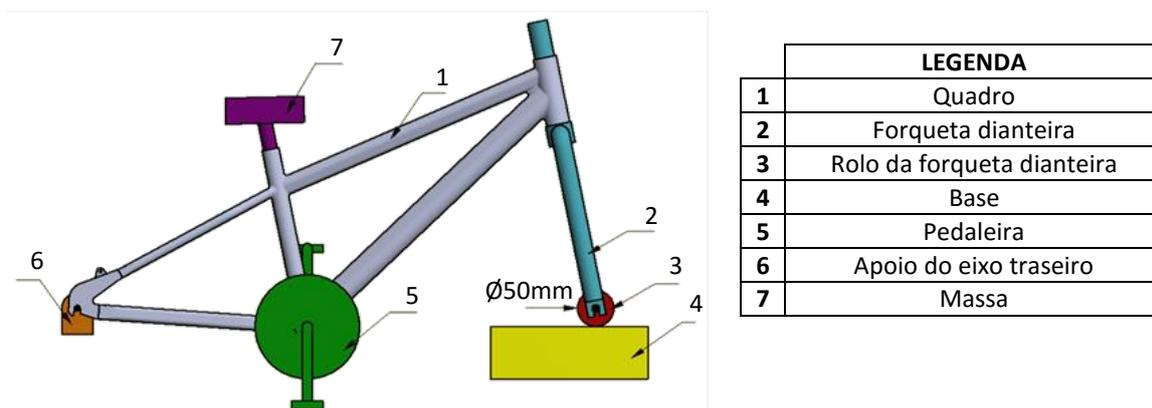


Figura 2.2. Ensaio estático da norma DIN 79100.

Nesta secção apresentam-se apenas os ensaios definidos na norma ISO 4210, uma vez que atualmente só estes são utilizados para a certificação dos quadros. A norma ISO 4210, utilizada como referência neste trabalho, corresponde à segunda edição, do ano 2015, onde estão presentes os vários ensaios dinâmicos que devem ser aplicados na análise estrutural do quadro [3].

2.1. Ensaio de impacto de massa em queda livre

A representação esquemática deste ensaio consta na Figura 2.3, onde os elementos utilizados são identificados com números. Trata-se de um teste à compressão que consiste em fixar o quadro (1) pelo seu eixo traseiro, mantendo-o alinhado com o eixo dianteiro na direção vertical, sendo largada uma massa (3) de 22,5 kg, a partir de uma altura h_1 , definida na norma para cada tipo de quadro. Para o tipo em análise, o valor de h_1 é de 360mm.

Numa fase inicial, a massa é pousada estaticamente no rolo, de modo a avaliar a distância entre os eixos da bicicleta. Este valor é considerado como referência. Após o impacto da massa no rolo da forqueta dianteira, considera-se como final do ensaio o instante em que a massa deixa de ressaltar, ficando assente em cima do rolo (4). Nesse instante é novamente medida a distância entre eixos, que é comparada com o valor de referência. Esta

diferença na distância entre eixos é originada pela deformação ocorrida no quadro, após o impacto.

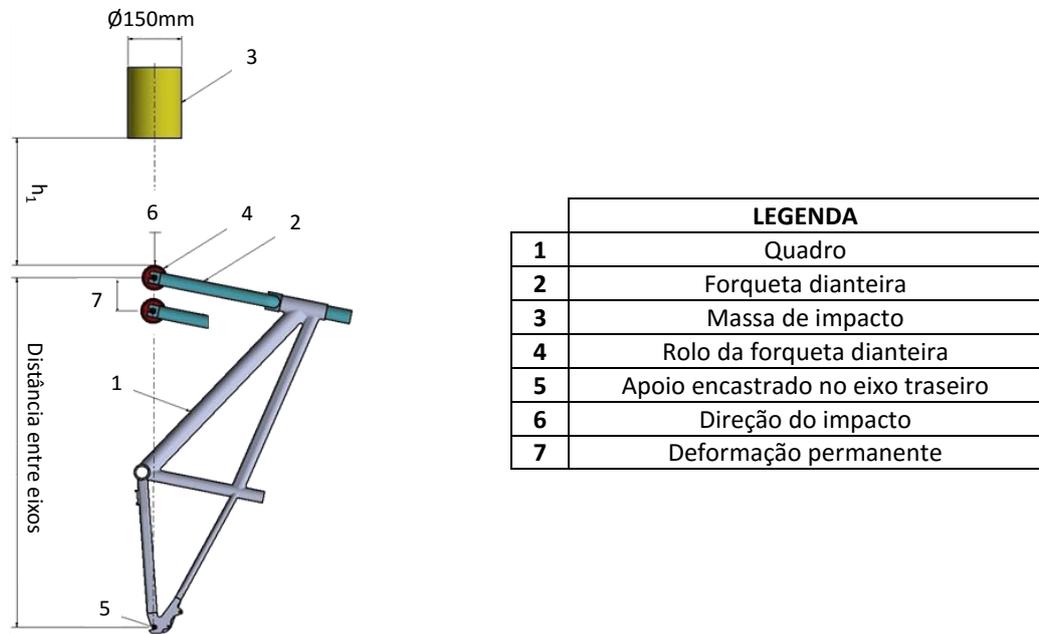


Figura 2.3. Montagem do quadro e forqueta dianteira num ensaio de impacto de massa em queda.

A norma especifica o deslocamento máximo admissível em função do tipo de quadro e de forqueta utilizada. Para o quadro de uma bicicleta de montanha e tendo em conta que se está a utilizar uma forqueta de testes, desenhada especificamente para a realização dos ensaios efetuados ao longo deste trabalho, o deslocamento não pode exceder os 10mm, assim como não pode ocorrer fratura ou algum tipo de fendas visíveis em qualquer parte do quadro [3].

2.2. Ensaio de impacto de quadro em queda

Neste ensaio, como apresentado na Figura 2.4, o quadro (1) é testado à tração, com o eixo traseiro montado de forma que o quadro possa rodar livremente sobre ele próprio. O rolo da forqueta dianteira (6) deve estar inicialmente assente num bloco de aço (7), de modo a que o quadro esteja na posição normal de utilização (ou seja, com o eixo dianteiro alinhado horizontalmente com o traseiro).

Para a realização do ensaio, a distância entre o bloco e o ponto mais baixo do rolo deve ser h_2 , como definido na norma. Para este tipo de quadro, a altura h_2 a que o quadro deve ser largado é de 300mm. Além disso, têm que ser montadas 3 massas, nas seguintes condições:

- Uma massa M_1 (3), montada no lugar do espigão do selim, cujo centro de gravidade dista $D = 75\text{mm}$ da extremidade do quadro;
- Uma massa M_2 (4), que deve ser fixa no topo da forqueta;
- Uma massa M_3 (5), que deve ser fixa na zona da pedaleira.

Para um quadro de bicicleta de montanha, os valores de M_1 , M_2 e M_3 são de, respetivamente, 30kg, 10kg, 50kg.

Numa fase inicial, o quadro está somente assente no bloco, com todas as massas devidamente montadas. Nesta fase é medida a distância entre eixos que será utilizada como referência. O quadro é erguido à altura h_2 e largado, até o rolo assentar estaticamente sobre o bloco. Neste instante, o quadro é novamente erguido à altura h_2 e largado. O ensaio termina assim que o quadro esteja novamente assente de forma estática no bloco, após o impacto e sucessivos ressaltos. Neste instante, é novamente medida a distância entre eixos, que é comparada com o valor de referência. Esta diferença corresponde ao deslocamento horizontal do eixo frontal devido à deformação ocorrida no quadro, após impacto.

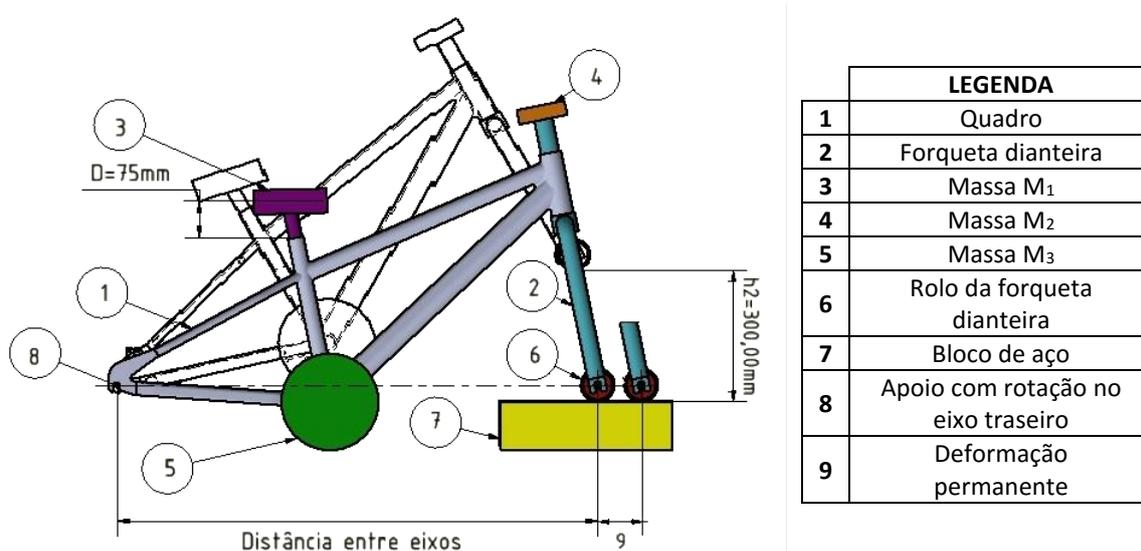


Figura 2.4. Montagem do quadro e forqueta dianteira num ensaio de impacto de quadro em queda.

De acordo com a norma, para além da não existência de fraturas ou fendas visíveis em qualquer parte do quadro de bicicleta de montanha, este será validado caso o deslocamento seja igual ou inferior a 60mm [3].

2.3. Ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar

Neste ensaio, como se mostra na Figura 2.5, fixa-se a forqueta dianteira (2) pelo seu eixo a um apoio rígido (3) de altura R_w (que corresponde ao raio do conjunto composto pelo pneu e pela jante), sendo permitida à forqueta a rotação em torno do eixo. Os *dropouts* traseiros estão montados pelo eixo a um apoio vertical resistente (6), com a mesma altura do apoio rígido dianteiro, permitindo a rotação em torno do eixo, porém restringindo o movimento no plano lateral. O apoio traseiro deve ter uma rótula (7) na sua extremidade inferior.

Na *bottom bracket* é montado o conjunto da pedaleira e corrente ou, preferivelmente, um adaptador (4) desenhado propositadamente para efeitos de teste, com uma rigidez superior à dos conjuntos disponibilizados comercialmente. Apesar da norma não especificar o valor da rigidez, esta deve ser tal que minimize a deformação do adaptador.

No caso em estudo optou-se pela definição de um adaptador, tal como está ilustrado na Figura 2.5. Este deve ser desenhado de modo a garantir alguns aspetos, como:

- O adaptador, que simula o comportamento da pedaleira, tem que girar livremente em torno do eixo da *bottom bracket*. O comprimento (L) dos braços inclinados (correspondentes aos braços onde se montam os pedais) em ambos os lados é de 175mm, estando estes inclinados para a frente e no sentido descendente, fazendo um ângulo de 45° com a horizontal (com uma tolerância de $\pm 2,0^\circ$).
- Este componente deve ainda contar com um braço vertical (que corresponde à roda dentada da pedaleira), com um comprimento R_C de 75mm. Este braço vertical deve estar ligado a um tirante (5).
- O tirante está também ligado ao eixo traseiro e apresenta rotação livre em ambas as extremidades. Deve ainda estar paralelo ao plano vertical que passa pela linha média do quadro, sendo a distância entre este plano e o plano médio do tirante de 50mm (ver Figura 2.6).

Cada braço inclinado do adaptador está sujeito a uma força F_1 descendente, exercida a uma distância de 150mm do plano vertical que passa pela linha média do quadro, fazendo um ângulo de $7,5^\circ$ com a direção vertical (com uma tolerância de $\pm 0,5^\circ$), como se pode ver na Figura 2.6. De acordo com a norma, para uma bicicleta de montanha a força F_1 deve ter um valor de 1200N. Estas cargas procuram simular o movimento associado ao

pedalar, pelo que a norma especifica que, aquando da sua aplicação deve ser garantido que a força exercida num dos braços seja igual ou inferior a 5% da carga máxima, antes de se dar início à aplicação da carga no braço do lado oposto.

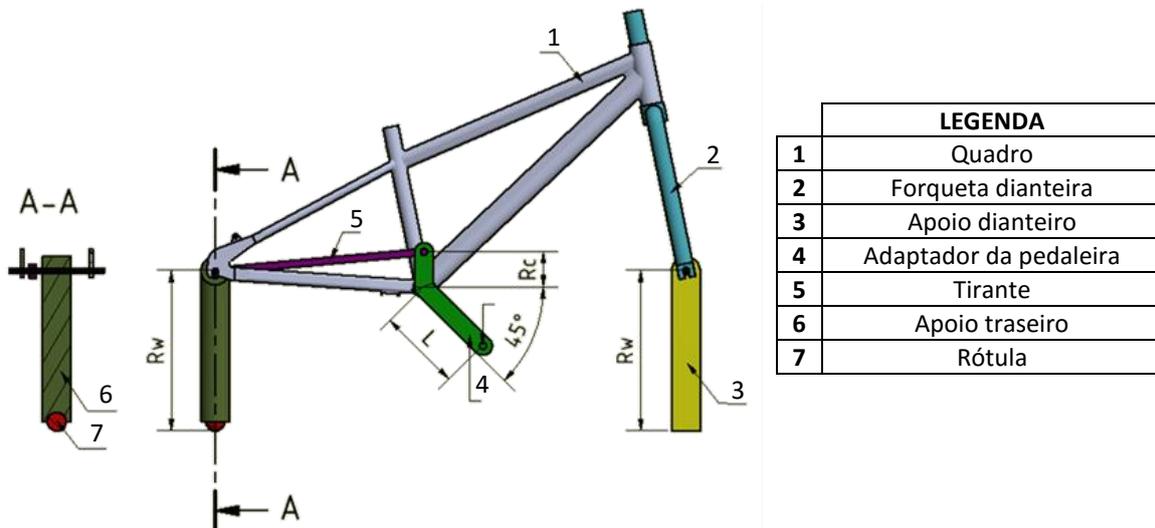


Figura 2.5. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar.

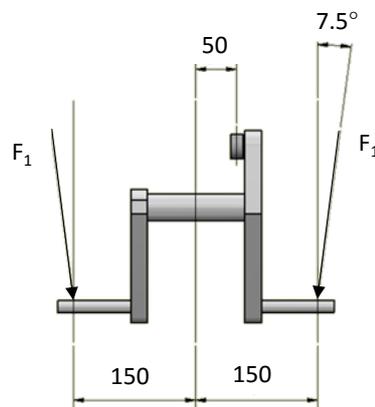


Figura 2.6. Pormenor das distâncias (em milímetros) e pontos de aplicação das forças no adaptador da pedaleira, de acordo com a norma.

As cargas de teste têm de ser aplicadas em 100 000 ciclos, tendo em conta que um ciclo corresponde à aplicação e remoção das duas forças. A frequência de aplicação das cargas de teste referida na norma é de 25Hz. No entanto, de acordo com a ABIMOTA, costuma ser utilizado o valor de 1 a 2Hz, de modo a permitir uma melhor avaliação do comportamento do material à solicitação dinâmica que é imposta.

Pela norma, o quadro pode-se considerar validado, após a realização deste ensaio, caso não existam fendas ou fraturas visíveis em qualquer ponto do quadro, e não

deve ocorrer separação de quaisquer componentes do sistema de suspensão, quando aplicável [3].

2.4. Ensaio de fadiga com forças horizontais

Neste ensaio, o quadro é montado na sua posição normal de utilização e fixo pelos *dropouts* traseiros, não restringindo a rotação no eixo traseiro. Assim, tal como se mostra na Figura 2.7, deve-se garantir que o eixo de rotação dos eixos dianteiro e traseiro estão alinhados na direção horizontal.

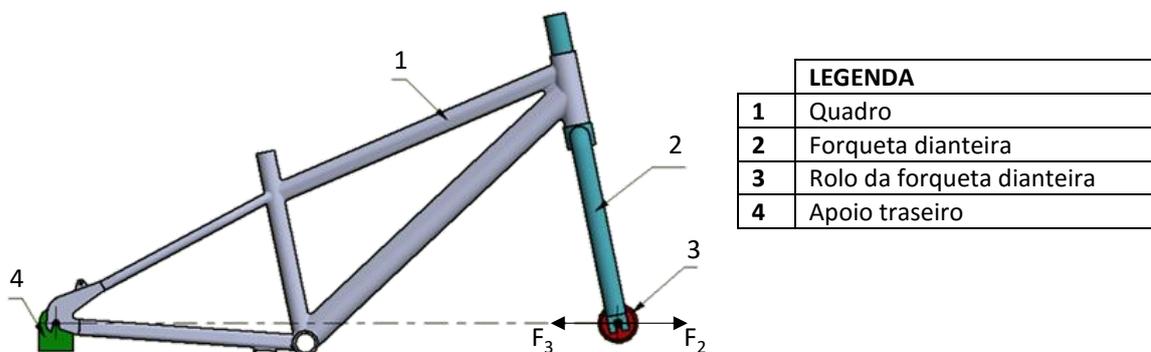


Figura 2.7. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com forças horizontais.

O ensaio envolve a aplicação de ciclos de carga dinâmicos na direção horizontal, na zona do eixo dianteiro, através de uma força F_2 , que aponta para a dianteira do quadro, e de uma força F_3 , que aponta para a traseira. O movimento da forqueta dianteira deve ser restringido na direção vertical, porém deve estar livre para avançar/recuar na direção horizontal, aquando da aplicação das forças.

O número de ciclos, C_1 , está definido na norma para cada tipo de quadro, mas a frequência de aplicação da carga não é imposta. De acordo com a ABIMOTA, a velocidade de aplicação das forças deve ser de 1Hz. Assim, para o quadro de bicicleta de montanha, temos, de acordo com a norma:

- $F_2 = 1200\text{N}$
- $F_3 = 600\text{N}$
- $C_1 = 50000$ ciclos

Para o quadro ser considerado como validado, após a realização do ensaio, não deve ter fendas visíveis ou fraturas em qualquer ponto, e não deve ocorrer separação de qualquer componente do sistema de suspensão, quando aplicável [3].

2.5. Ensaio de fadiga com uma força vertical

Com se mostra na Figura 2.8, neste ensaio o quadro deve ser montado na sua posição normal de funcionamento, de forma que a rotação não esteja restringida no eixo traseiro. O ensaio envolve a montagem de um rolo (3) no eixo da forqueta dianteira, de modo a que o quadro possa fletir através de um movimento de avanço/retrocesso do eixo dianteiro, resultante da aplicação da força de teste.

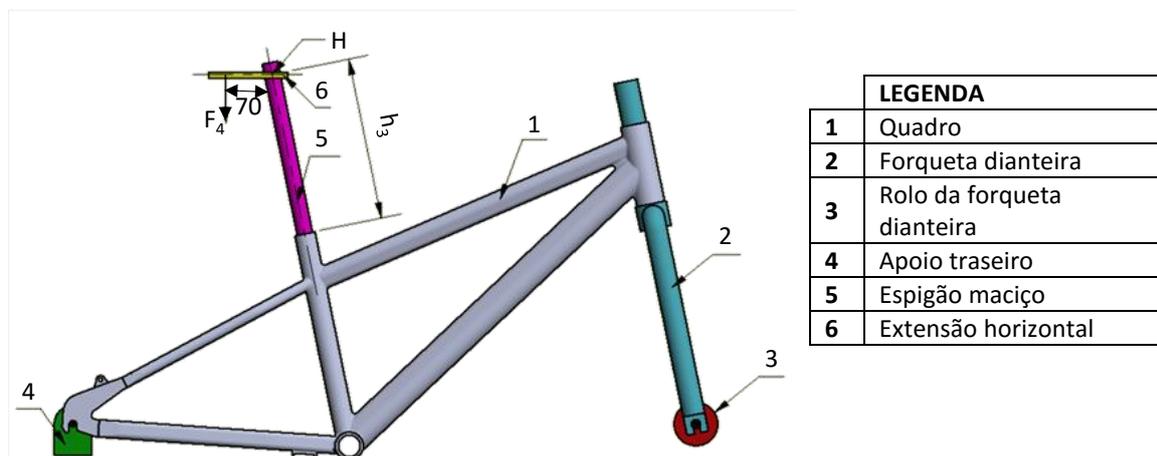


Figura 2.8. Montagem do quadro num ensaio de fadiga com uma força vertical.

Deve ser inserido um espigão (5) composto por uma barra maciça no *seat tube*, a uma profundidade de 75mm, sendo fixo da forma predefinida pelo construtor, i.e. com a abraçadeira usualmente utilizada. A este espigão deve estar acoplada uma extensão horizontal (6), que se prolonga para a parte traseira do quadro. A esta extensão deve estar associada uma distância h_3 entre o topo do *seat tube* e um ponto H, que é equivalente ao centro da abraçadeira do selim, quando este está na altura máxima recomendada para o quadro em análise. Caso esta altura não seja disponibilizada, assume-se que h_3 é igual a 250mm.

O ensaio envolve a aplicação de ciclos dinâmicos de carga, com uma força F_4 , vertical e descendente, num ponto da extensão horizontal que dista 70mm da intersecção da linha média da extensão na direção vertical com o eixo do espigão, durante 50 000 ciclos de

teste. De acordo com a norma, para um quadro de bicicleta de montanha, a força F_4 tem o valor de 1200N. O valor de velocidade de aplicação da carga, de acordo com a ABIMOTA, é geralmente de 2Hz, apesar de na norma estar definido o valor de 3Hz.

O quadro será validado caso não exista qualquer tipo de fissura ou fratura na estrutura após a realização do ensaio, assim como não deve ocorrer a separação de qualquer componente do sistema de suspensão, quando aplicável [3].

3. MODELAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes de proceder à simulação numérica, o modelo do quadro enviado pela Triangle's, num ficheiro no formato IGS (baseado no formato IGES, *Initial Graphics Exchange Specification*, com definição das superfícies 3D) teve de ser importado para o *software* de modelação. O programa de CAD (*Computer Aided Design*) selecionado foi o *Autodesk Inventor 2016*. Este foi escolhido de modo a aproveitar as potencialidades do programa *Autodesk Simulation Mechanical*, destinado à análise pelo método dos elementos finitos, e que funciona de forma integrada com o *Autodesk Inventor* [4]. Os motivos para a seleção deste programa serão explicados em maior detalhe no subcapítulo 4.1.

O *Autodesk Inventor* é um modelador de sólidos, sendo por isso necessário converter as superfícies 3D em sólidos. Aquando da importação do ficheiro IGS, foram detetados alguns erros geométricos que não permitiram a conversão direta. Estes erros resumiam-se essencialmente a superfícies abertas que impediam a definição de um sólido (ver Figura 3.1). Foi necessário proceder à correção destes erros geométricos, etapa que se revelou muito morosa. De facto, vários autores têm apontado as dificuldades de ligação entre as ferramentas de CAD e CAE (*Computer Aided Engineering*), sendo que se estima que 80% do tempo de análise é despendido na reconstrução do modelo e na etapa de geração de malha de elementos finitos [5].

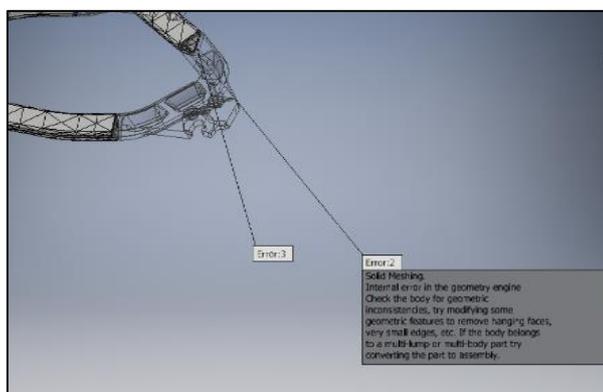


Figura 3.1. Erro na geração de um objeto sólido a partir de uma superfície 3D.

Importa realçar que foi ponderada a hipótese de recorrer à modelação de apenas metade do quadro, de modo a aproveitar as condições de simetria de alguns dos ensaios

especificados na Norma ISO 4210. No entanto, a geometria do quadro de bicicleta adotado não é simétrica, em função do posicionamento da pedaleira.

Para além do quadro, foi ainda necessário proceder ao desenho dos componentes utilizados na execução dos ensaios. Um componente comum a todos os ensaios é a forqueta de testes. Como não foi fornecida qualquer forqueta/suspensão com o quadro, foi necessário desenhar uma de raiz, a partir das dimensões da maior forqueta/suspensão selecionadas para funcionar com este quadro, tendo em conta o diâmetro das rodas. Este componente deve apresentar uma rigidez que garanta a menor deformação possível, de modo a que os esforços sejam aplicados de forma mais direta no quadro, i.e. o quadro deve ser colocado na situação mais desfavorável aquando da realização dos ensaios. Como tal, a forqueta de testes deve ser desenhada tendo como prioridade a sua robustez. Assim, a forqueta não foi desenhada como sendo tubular, como é apanágio na vertente comercial destes componentes, mas sim sólida.

As recomendações da norma ISO 4210 indicam que se deve utilizar o mesmo comprimento *axle to crown*, L_{ac} , correspondente à forqueta de maior comprimento, destinada a ser utilizada no quadro em estudo (ver Figura 3.2). Uma vez que a norma não define as dimensões da forqueta, para se ter uma noção dos valores a utilizar foi feita uma análise de mercado, tendo em conta as forquetas de maior dimensão indicadas para a utilização neste tipo de quadro, i.e. de montanha, quadro rígido, com rodas de 26 polegadas. Para efeitos desta análise é necessário ter em conta que, em média, nesta situação tem-se um curso de amortecimento da suspensão dianteira de, no máximo, 130mm.

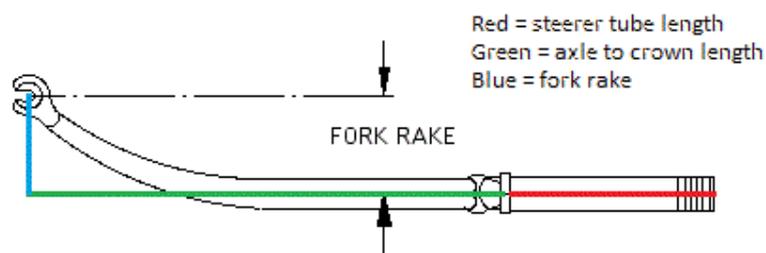


Figura 3.2. Dimensões características de uma forqueta [6].

De entre as marcas de forquetas mais vendidas, destacam-se a FOX e a RockShox. Para o curso de amortecimento de 130mm, identificou-se o comprimento *axle to crown* de 500,9mm, para os modelos da FOX, e de 509mm como dimensão máxima entre

os modelos da RockShox [7]. Como tal, neste estudo foi utilizado o valor de 509mm, uma vez que coloca o quadro na situação mais desfavorável. Com base nesta análise, procedeu-se ao projeto da forqueta de testes, com as dimensões apresentadas na Figura 3.3.

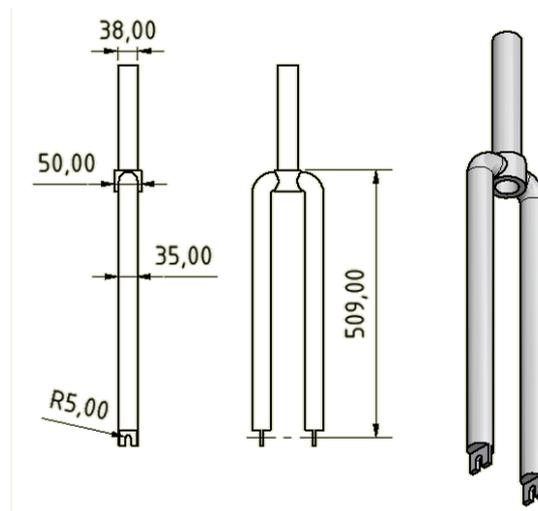


Figura 3.3. Forqueta de testes e respetivas dimensões.

De modo a validar a resistência da forqueta de testes, a norma refere a verificação de duas razões de deflexão (D_r) [3]:

- a) A razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de fadiga não deve exceder 1,0, sendo calculada da seguinte forma:

$$D_{ra} = \frac{10000K_1\delta}{L_{ac}^3}, \quad (3.1)$$

sendo D_{ra} a razão de deflexão da forqueta para ensaios de fadiga; K_1 uma constante, de valor 1417; L_{ac} o comprimento do garfo, expresso em milímetros; e δ a deflexão no ponto de aplicação da força, expressa em milímetros.

- b) A razão de deflexão da forqueta de testes para os ensaios de impacto não deve exceder 1.0, sendo calculada da seguinte forma:

$$D_{rb} = \frac{10000K_2\delta}{L_{ac}^3}, \quad (3.2)$$

sendo D_{rb} a razão de deflexão da forqueta para ensaios de impacto; K_2 uma constante, de valor 709.

O valor da deflexão é obtido após a realização de um ensaio estático, em que uma carga vertical de sentido descendente e com um módulo de 1200N atua sobre o eixo da forqueta.

Esta é segura por meio de um elemento que simula o efeito do *head tube* (ver Figura 2.1), com um comprimento de 150mm.

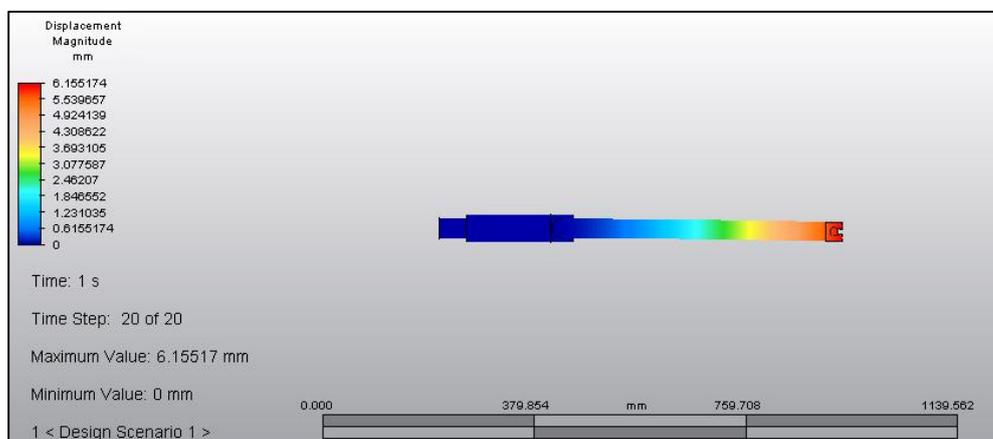


Figura 3.4. Ensaio estático da forqueta de testes.

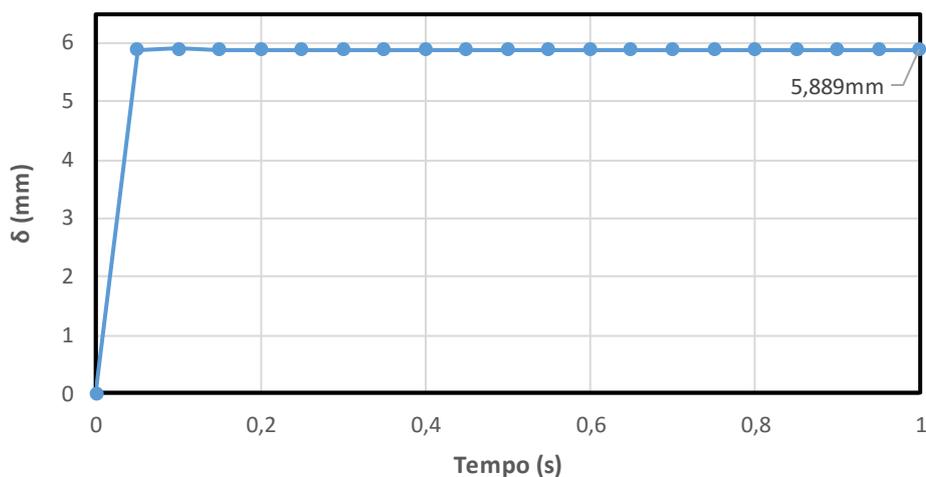


Figura 3.5. Valores da deflexão δ obtidos no ensaio estático da forqueta.

Esta análise estática foi realizada de forma muito simples e direta no programa de elementos finitos selecionado, pelo que se mostra apenas o resultado obtido na Figura 3.4. O valor obtido para a deflexão δ no *software* de análise de elementos finitos é de 5,889mm (ver gráfico da Figura 3.5), considerando que é construída no mesmo material utilizado para o quadro (ver detalhes na secção 4.1). Com base neste resultado, os valores obtidos para as razões de deflexão são de:

$$D_{ra} = \frac{10000 \times 1417 \times 5,889}{509^3}$$

$$D_{rb} = \frac{10000 \times 709 \times 5,889}{509^3}$$

Desta forma, a forqueta de testes foi considerada válida para a realização dos ensaios, de acordo com a norma ISO 4210.

3.1. Ensaio de impacto de massa em queda livre

No ensaio de impacto de massa em queda livre, conforme já foi descrito no subcapítulo 2.1, é necessário definir uma massa de impacto que irá embater no rolo montado no eixo da forqueta dianteira (ver Figura 2.3). Para se proceder a este ensaio, foi ainda necessário construir o rolo e o pino de fixação de raiz.

A massa de impacto foi desenhada com a forma de um cilindro com 150mm de diâmetro, de acordo com a norma. A altura arbitrada foi de 200mm, como se mostra na Figura 3.6 (a). A norma especifica que este componente deve ter uma massa de 22,5kg. O *software* de modelação utilizado permite calcular a massa de um componente com base no produto do volume pela densidade do material que o constitui. A utilização desta funcionalidade implica que é necessário fazer primeiro o cálculo do volume que o componente deve ter, para se obter a massa pretendida. No entanto, o único objeto de estudo é o quadro e não os componentes auxiliares para a realização dos testes. Assim, a alternativa é desenhar o componente sem preocupações em relação ao volume, e proceder à modificação das propriedades do material, de modo a utilizar a densidade como variável para garantir a massa requerida. Esta solução é mais simples, uma vez que o valor da massa não pode ser determinado diretamente no programa de análise de elementos finitos utilizado.

Em relação ao rolo da forqueta dianteira, a norma ISO 4210 especifica que o seu diâmetro exterior máximo tem um valor igual ou inferior a 55mm. Tendo isto em conta, assim como as dimensões da forqueta, foi elaborado o desenho deste componente, como se mostra na Figura 3.6 (b).

De modo a simular da melhor forma possível as condições do ensaio, foi necessário conceber um outro componente que está fixo na forqueta, e permite fazer a ligação do rolo à forqueta dianteira. A junção destes 3 componentes resulta no conjunto da forqueta dianteira, como se mostra na Figura 3.7, que será também utilizado no ensaio de impacto do quadro em queda.

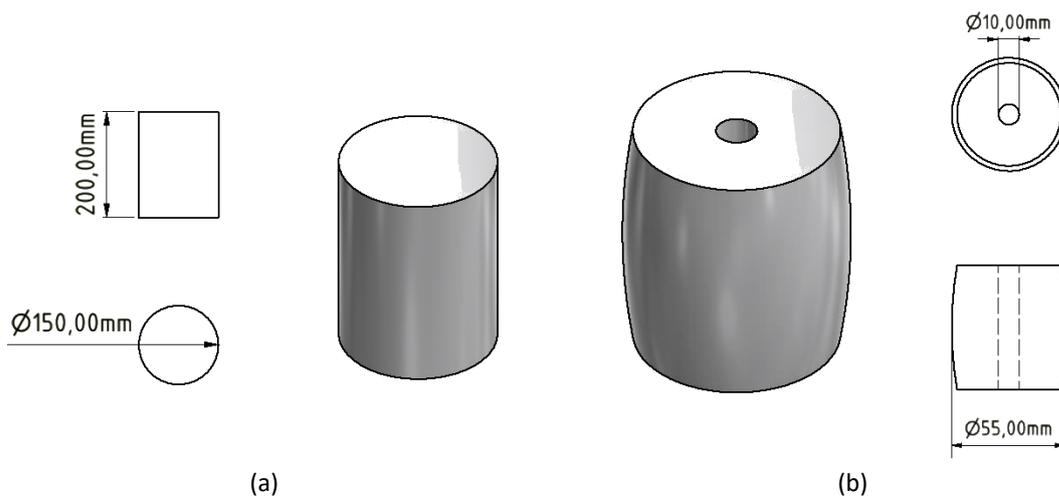


Figura 3.6. (a) Massa de impacto e respectivas dimensões, (b) Rolo da forqueta dianteira e respectivas dimensões.

Após o desenho dos componentes, é necessário proceder à montagem dos mesmos, de modo a replicar as condições de teste previstas na norma. O conjunto da forqueta é montado na devida posição, no *head tube* do quadro. Para facilitar a implementação das condições do ensaio no *software* de análise de elementos finitos, é imposta uma condição que mantém os eixos dianteiro e traseiro alinhados na direção vertical, como se mostra Figura 3.8.

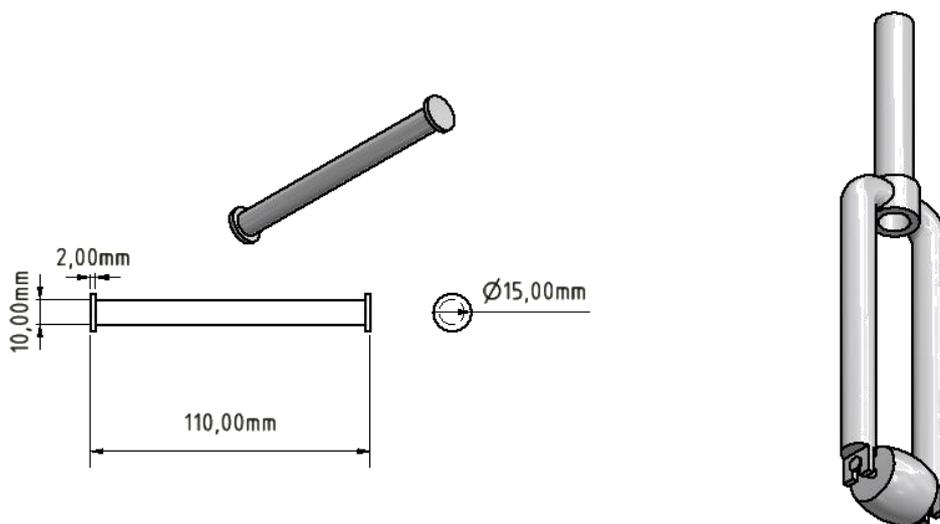


Figura 3.7. Conjunto da forqueta dianteira e elemento de ligação do rolo à forqueta.

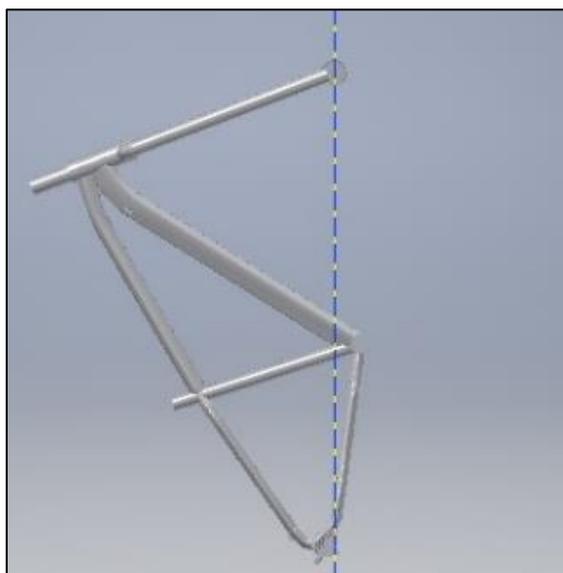


Figura 3.8. Alinhamento dos eixos dianteiro e traseiro na direção vertical.

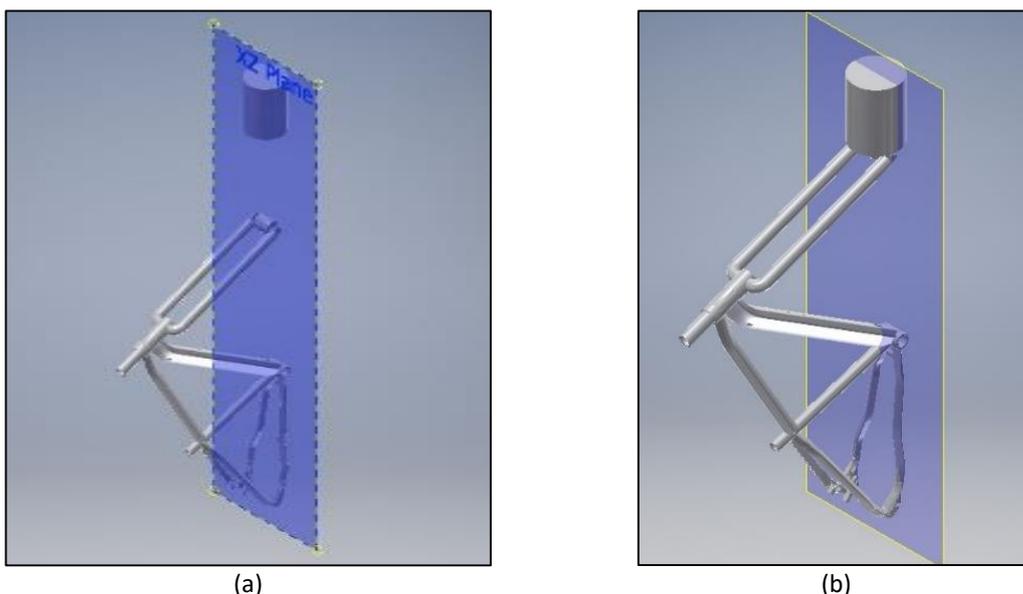


Figura 3.9. (a) Aspeto final do modelo para o ensaio de impacto – massa em queda livre, (b) Modelação da situação inicial do ensaio, com a massa assente em repouso no rolo da forqueta dianteira.

A massa de impacto também deve estar alinhada na mesma direção, sendo ainda imposta uma distância mínima de 360mm à superfície do rolo da forqueta dianteira, conforme descrito na norma (ver subcapítulo 2.1). A Figura 3.9 (a) mostra o conjunto final obtido para o ensaio de impacto – massa em queda livre, pronto para ser exportado para o *software Autodesk Simulation Mechanical*.

O mesmo procedimento é aplicado para a medição da distância entre eixos de referência, i.e. na situação inicial em que a massa se encontra em repouso em cima do rolo

da forqueta dianteira. A única diferença no modelo reside precisamente no facto da massa estar assente em cima do rolo, como se mostra na Figura 3.9 (b).

3.2. Ensaio de impacto de quadro em queda

Neste ensaio, para além do conjunto da forqueta dianteira apresentado no subcapítulo 3.1, e de acordo com o procedimento descrito pela norma ISO 4210 no subcapítulo 2.2, foi necessário criar os modelos das três massas e do bloco onde o rolo da forqueta irá embater.

Em relação às massas, à semelhança do que foi feito no ensaio de impacto de massa em queda, e não havendo qualquer limitação por parte da norma ISO 4210 relativamente às suas dimensões, estas foram desenhadas com medidas arbitrárias. Posteriormente, foi introduzido o valor da densidade do material que garante o valor de massa pretendido.

A massa M_1 , que será montada no *seat tube* (ver Figura 2.4), deve ser desenhada de forma a ter em conta o ângulo de inclinação deste elemento. Deste modo é possível garantir que a massa se mantém numa posição aproximadamente horizontal, quando o quadro está na sua posição normal de utilização. A Figura 3.10 ilustra a determinação do ângulo de inclinação do *seat tube*, utilizado na construção da massa M_1 , como se mostra na Figura 3.11 (a).

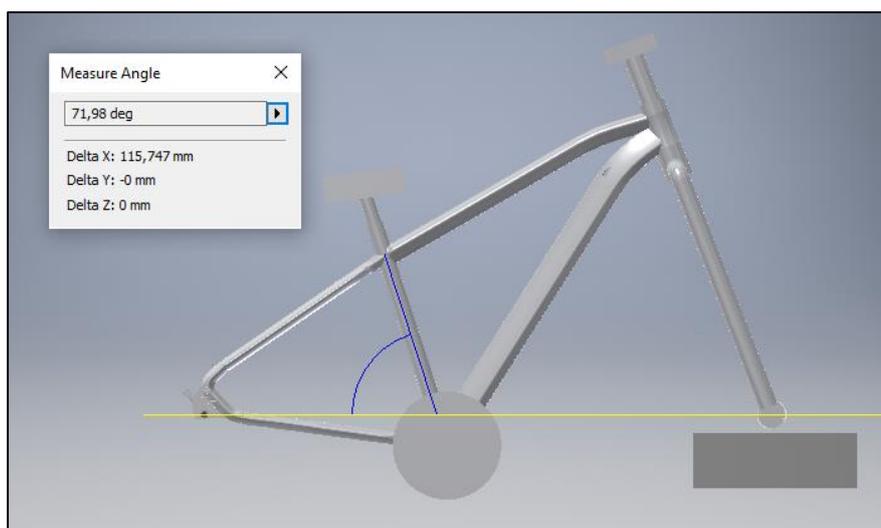


Figura 3.10. Medição do ângulo do *seat tube* em relação à direção vertical.

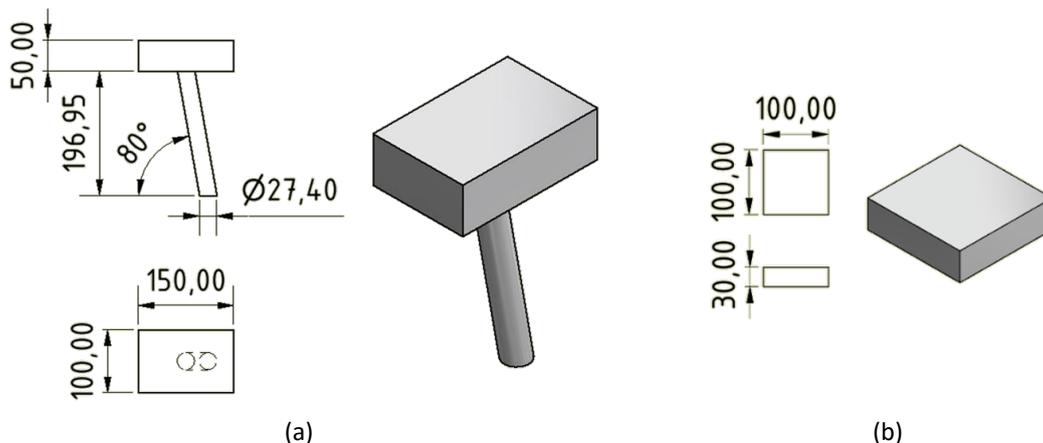


Figura 3.11. (a) Massa M_1 e respetivas dimensões, (b) Massa M_2 e respetivas dimensões.

A massa M_2 não tem qualquer restrição em termos de dimensões e será montada no topo da forqueta (ver Figura 2.4). Assim, considerou-se um paralelepípedo com as dimensões apresentadas na Figura 3.11 (b).

No caso da massa M_3 , fixa ao quadro no *bottom bracket* (ver Figura 2.4), foi construída de modo a ser simétrica em relação à linha média do quadro, mantendo uma distribuição de peso idêntica para ambos os lados da estrutura. A Figura 3.12 (a) apresenta as dimensões adotadas para massa M_3 , bem como o detalhe da zona de fixação no *bottom bracket*.

Por fim, o bloco de aço foi concebido de forma a garantir que os esforços sejam transmitidos apenas ao quadro, não devendo por isso deformar-se. Para além disso, também é necessário garantir que o seu comprimento permite algum deslocamento do rolo da forqueta dianteira na sua superfície, devido à deformação do quadro. As dimensões finais adotadas são apresentadas na Figura 3.12 (b).

Para além destes componentes, e de forma a aplicar as condições de fronteira adequadas à realização do ensaio (conforme serão descritas no subcapítulo 4.2.2), foi ainda desenhado um eixo traseiro para o quadro, e dois suportes para a sua montagem. O eixo deve ter o diâmetro correto, de acordo com as dimensões do quadro, e comprimento superior à distância entre as superfícies exteriores dos *dropouts*. A Figura 3.13 apresenta o detalhe dos *dropouts*, de modo a evidenciar as dimensões selecionadas para o eixo. Os suportes só têm como restrição o diâmetro interior, que deve ser igual ao diâmetro exterior do eixo. Assim sendo, utilizou-se uma forma o mais simplificada possível, como se ilustra na Figura 3.14.

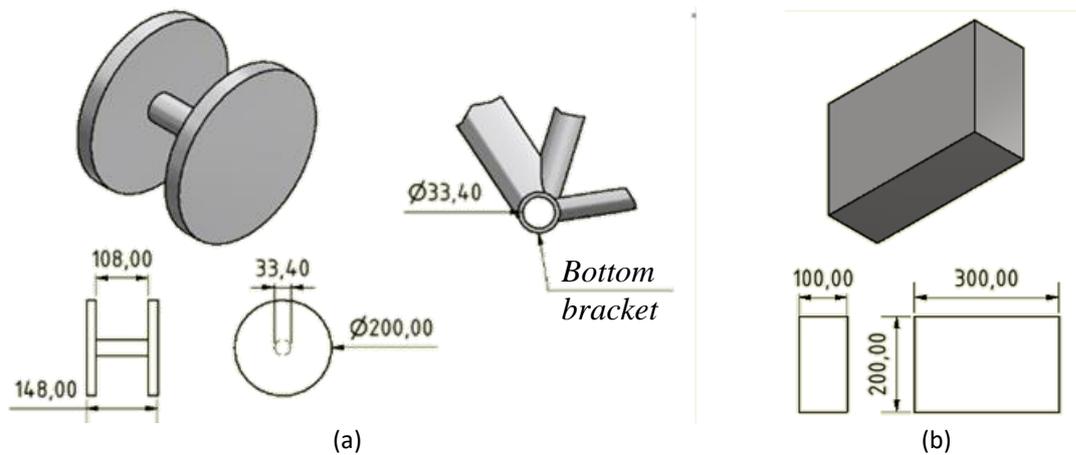


Figura 3.12. (a) Dimensões da massa M_3 e detalhe da zona de fixação no *bottom bracket*, (b) bloco de aço e respetivas dimensões.

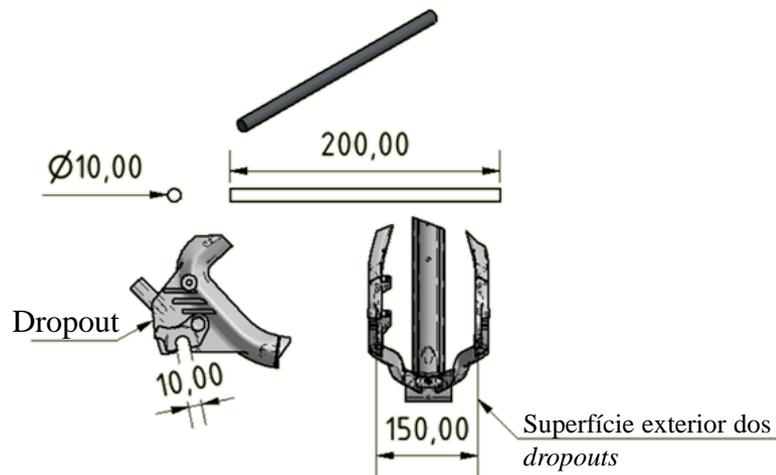


Figura 3.13. Dimensões do eixo traseiro e detalhe dos *dropouts*.

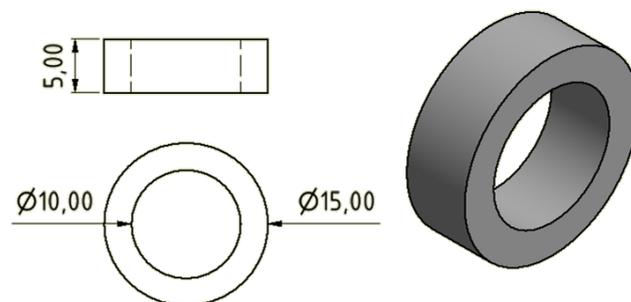


Figura 3.14. Suporte do eixo traseiro e respetivas dimensões.

A Figura 3.15 (a) apresenta o esquema da montagem de todos os componentes projetados, conforme descrito na norma para o ensaio de impacto em análise. Para além dos

procedimentos normais de montagem, tem de ser imposta a distância de 300mm entre a superfície do bloco de aço e o ponto inferior do rolo da forqueta dianteira.

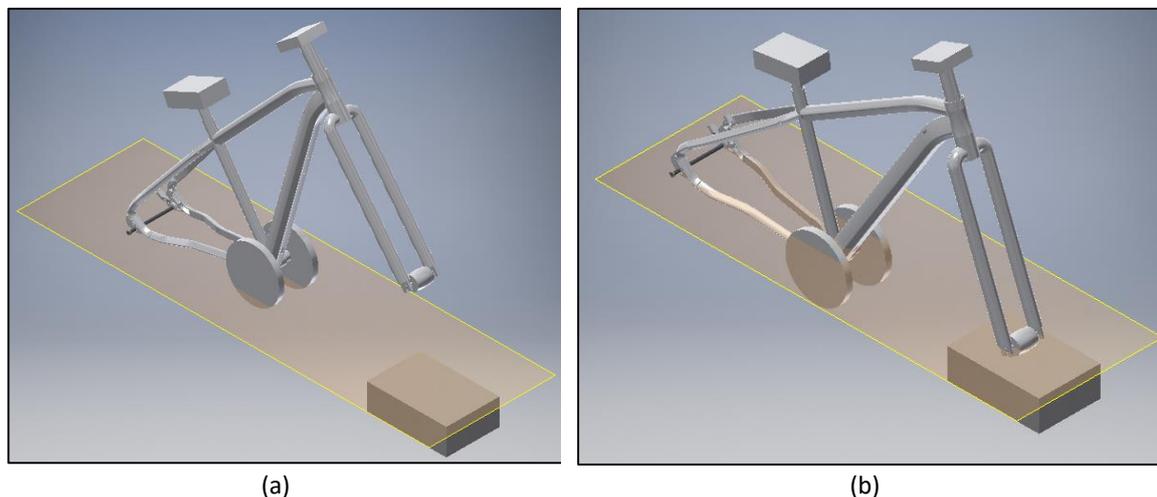


Figura 3.15. (a) Aspeto final do modelo para o ensaio de impacto – quadro em queda, (b) Modelação da situação inicial do ensaio, com o rolo da forqueta dianteira assente em repouso no bloco de aço.

O mesmo procedimento de montagem é aplicado para a medição da distância entre eixos de referência, i.e. na situação inicial em que o rolo se encontra em repouso na superfície do bloco de aço. A única diferença no modelo reside precisamente no facto do rolo estar assente em cima do bloco, como se mostra na Figura 3.15 (b).

3.3. Ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar

Neste ensaio, a etapa de modelação é um pouco mais minuciosa, uma vez que há um conjunto de dimensões pré-definidas na norma que têm que ser consideradas (ver subcapítulo 2.3). A montagem deste teste exige a definição do apoio dianteiro e traseiro, do adaptador da pedaleira, da esfera que irá funcionar como rótula no apoio traseiro, e do tirante que liga os dois apoios.

Os apoios dependem da dimensão R_w , que corresponde ao raio do conjunto composto pelo pneu e pela jante. Dado que não foi avançada a informação relativa às dimensões deste conjunto, foram utilizadas as medidas mais comuns nas bicicletas de montanha. Tendo em conta as dimensões do quadro, uma jante de 26 polegadas e um pneu com 2,35 polegadas de largura [8], obtém-se um diâmetro total de 678,38mm e, como tal, uma altura R_w de 339,19mm [9]. Como se pode ver na Figura 3.16 (a), esta medida corresponde à distância da base do apoio dianteiro até ao eixo da roda.

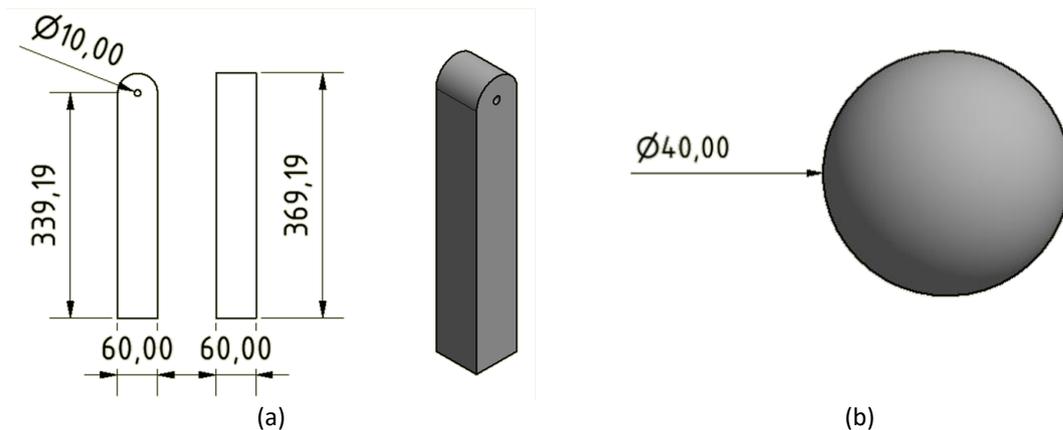


Figura 3.16. (a) Apoio dianteiro e respetivas dimensões, em milímetros; (b) esfera e respetivo diâmetro, em milímetros.

No caso do apoio traseiro, à altura R_w tem de ser subtraída o raio da esfera, para que a soma deste raio com o comprimento que vai desde a superfície inferior do apoio até ao eixo da roda seja igual à altura R_w . Assim, tendo sido definida uma esfera com raio de 20mm (ver Figura 3.16 (b)), este comprimento é de 319,19mm, conforme está ilustrado na Figura 3.17 (a).

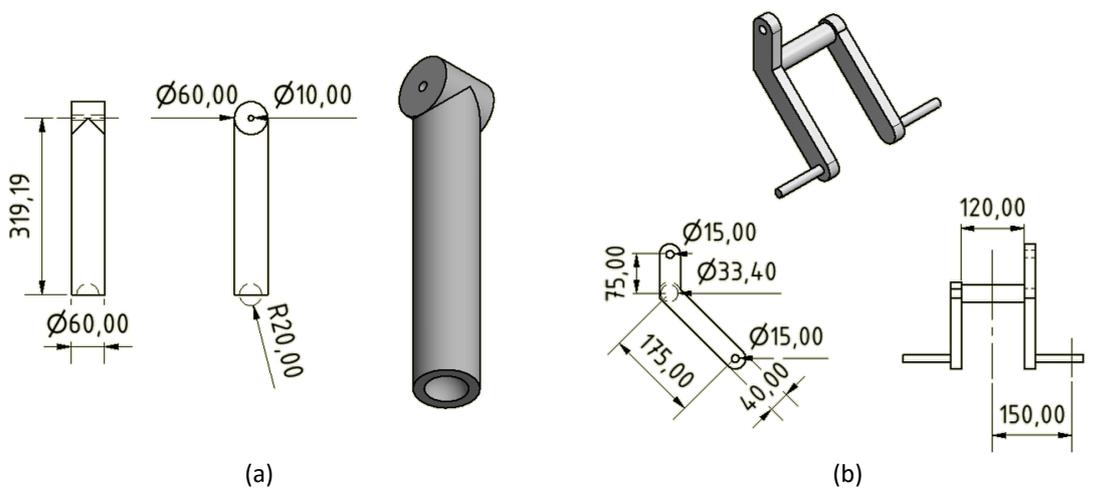


Figura 3.17. (a) Apoio traseiro e respetivas dimensões, em milímetros; (b) adaptador da pedaleira e respetivas dimensões, em milímetros.

O adaptador da pedaleira, conforme ilustrado na Figura 3.17 (b), deve conter dois braços inclinados, no sentido descendente e direcionados para a dianteira do quadro, estando um em cada lado do *bottom bracket*. Da mesma forma, deve existir um braço vertical apenas do lado onde estaria a roda dentada da pedaleira, i.e., no lado direito do *bottom bracket*. O desenho deste componente é restringido pelo comprimento L , de 75mm, que é o comprimento mínimo dos braços inclinados, de modo a que a força seja aplicada no sítio correto, e pelo ângulo de 45° entre estes braços e a direção horizontal. Para que as forças

possam ser aplicadas à distância de 150mm do plano médio do quadro da bicicleta, é necessário ter em conta uma extensão lateral destes braços, cujo comprimento deve ser superior a esta mesma distância. Outra dimensão a ter em conta é a altura R_C , correspondente ao comprimento do braço vertical, e que deve ter um valor de 75mm. É ainda necessário ter em atenção que o diâmetro do eixo do adaptador deve ser o mesmo do *bottom bracket* (conforme pode ser consultado na Figura 3.12, esta dimensão é de 33,40mm).

Em relação ao tirante, este componente corresponde a uma ligação entre o adaptador da pedaleira e o eixo traseiro. Por esta razão, apenas é necessário ter em conta os diâmetros necessários para a montagem em ambas as extremidades, e o comprimento entre os dois componentes que vai ligar. Após a montagem do quadro, e conforme se pode verificar na Figura 3.18, determinou-se que esta distância é de 446,73mm.



Figura 3.18. Tirante e respetivas dimensões, em milímetros.

Na montagem, é preciso ter em conta a distância de 50mm do plano médio do quadro ao plano médio do tirante (ver Figura 3.19).

Após o modelo estar integralmente montado, por uma questão de simplificação na definição das forças no *software* de análise de elementos finitos, alinou-se o plano vertical YZ com os eixos das extensões laterais dos braços inclinados do adaptador da pedaleira, conforme ilustrado na Figura 3.20.

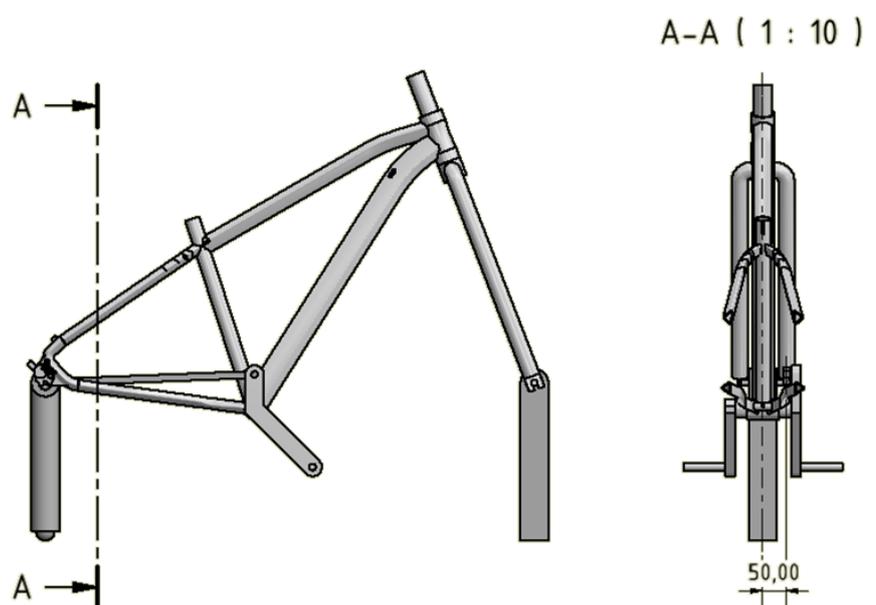


Figura 3.19. Pormenor da distância entre os planos médios do quadro e do tirante.

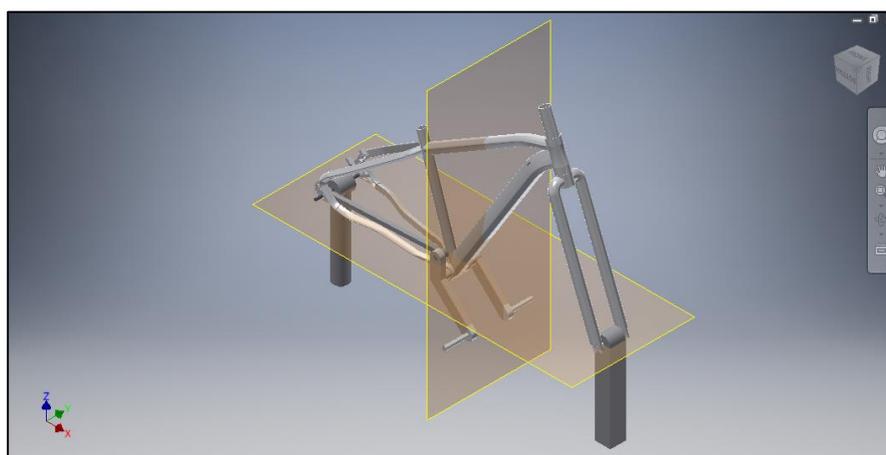


Figura 3.20. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com forças exercidas ao pedalar.

3.4. Ensaio de fadiga com forças horizontais

De acordo com as condições impostas pela norma ISO 4210, descritas no subcapítulo 2.4, este ensaio exige apenas a imposição de condições de fronteira no *software* de análise de elementos finitos. No entanto, optou-se por montar um pino na forqueta dianteira, de modo a facilitar a aplicação das cargas de teste. O pino utilizado corresponde ao elemento de ligação entre a forqueta dianteira e o respetivo rolo (conforme está ilustrado na Figura 3.7), pelo que não foi necessário projetar este componente. Na montagem,

conforme ilustrado na Figura 3.21, basta proceder à ligação do quadro, forqueta dianteira e pino.

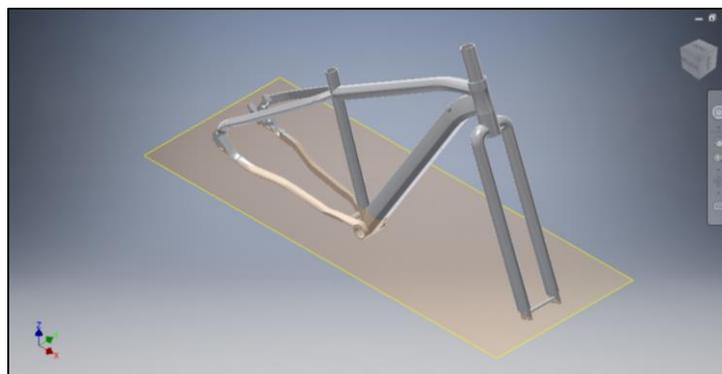


Figura 3.21. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com forças horizontais.

3.5. Ensaio de fadiga com uma força vertical

O ensaio de fadiga com uma força vertical, de acordo com a descrição apresentada na secção 2.5, requer um apoio e um eixo traseiro, o rolo da forqueta e o respetivo elemento de ligação. No entanto, com base nas condições de fronteira aplicáveis no *software* de análise de elementos finitos, o número de componentes em uso pode ser reduzido. Assim, é possível aplicar uma condição de fronteira que permita apenas a rotação do quadro sobre o eixo traseiro. O movimento de avanço e retrocesso do eixo dianteiro pode ser replicado impondo uma condição que permita apenas o seu deslocamento na direção horizontal. Resta assim desenhar os componentes que permitem a aplicação da carga de testes, nomeadamente o espigão maciço e a extensão horizontal.

O espigão deve ter em conta as dimensões relativas à instalação de ensaio, impostas na norma ISO 4210 e apresentadas neste documento, no subcapítulo 1.2.5. O espigão deve estar inserido a uma profundidade de 75mm no *seat tube*, tendo em conta uma altura h_3 de 250mm, pelo que o comprimento deste componente deve ser superior à soma destas duas dimensões. O diâmetro do espigão deve ser o mesmo da superfície interior do *seat tube*, com um valor medido de 27,40mm. As dimensões deste componente estão apresentadas na Figura 3.22 (a).

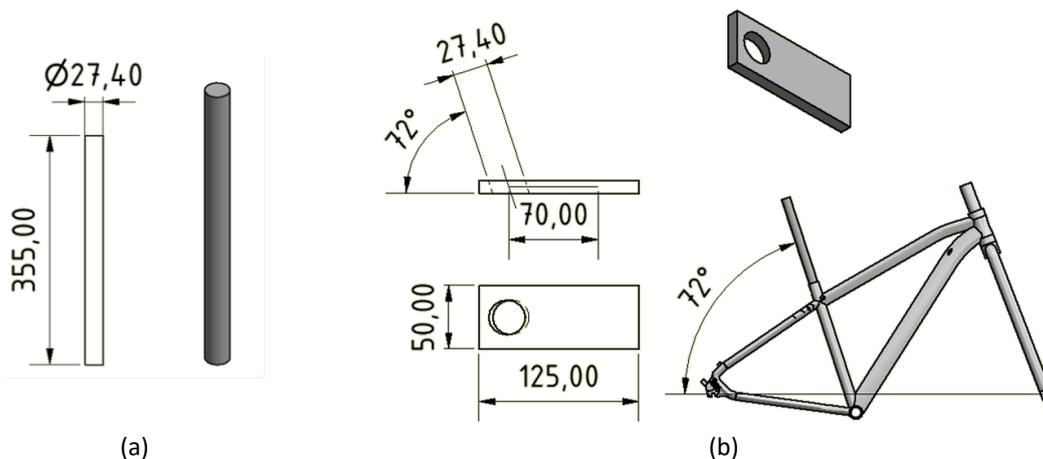


Figura 3.22. (a) Espigão e respectivas dimensões, em milímetros; (b) extensão horizontal, respectivas dimensões em milímetros e ângulo do espigão com o plano horizontal.

A extensão horizontal também tem de ser construída tendo em atenção a distância de 70mm entre o ponto de interseção do eixo do espigão e do plano médio da espessura da extensão e o ponto de aplicação da força F_4 . É necessário verificar o diâmetro do espigão, onde a extensão é montada, e deve-se ter também em conta o ângulo que o espigão faz com a direção horizontal quando está montado na instalação de testes, de modo a manter a extensão na horizontal (ver Figura 3.22 (b)). Por fim, resta proceder à montagem de todos os componentes, conforme ilustrado na Figura 3.23.

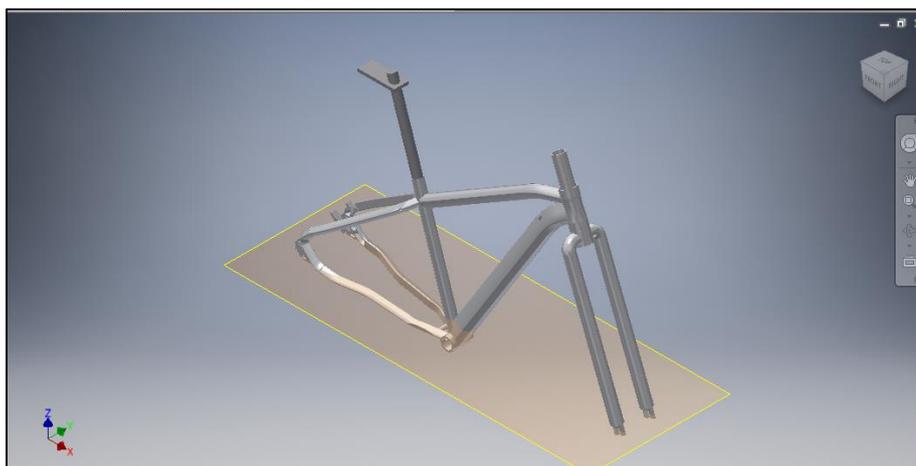


Figura 3.23. Aspeto final do modelo para o ensaio de fadiga com uma força vertical.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo são descritos todos os aspetos inerentes à componente de simulação numérica dos ensaios, desde as condições de fronteira, aos mais diversos tipos de solicitações que têm de ser replicados para garantir a coerência com as especificações da norma ISO 4210.

4.1. *Autodesk Simulation Mechanical*

O programa de análise de elementos finitos utilizado foi o *Simulation Mechanical* 2016, da *Autodesk*. Este programa foi desenvolvido para trabalhar diretamente com o *software* de CAD utilizado, o *Autodesk Inventor*, o que se traduz na compatibilidade direta dos ficheiros e numa vantagem ao nível da simbiose entre a simulação numérica e a modelação 3D, sempre que necessária.

O *Autodesk Simulation Mechanical* permite realizar diferentes tipos de análise, tendo sido utilizado para os ensaios dinâmicos o módulo *Mechanical Event Simulation* (MES) [4]. Este módulo permite replicar as condições de impacto especificadas nos ensaios. Para além disso, permite a aplicação de solicitações cíclicas.

Importa ainda realçar, uma vez que é uma potencial fonte de erros na simulação numérica, as unidades utilizadas pelo programa. Neste caso, dada a importação direta do modelo a partir do *Autodesk Inventor*, também as unidades são predefinidas de acordo com as adotadas para as dimensões no modelo CAD.

Tal como descrito na secção 3, o modelo CAD teve de ser corrigido no *Autodesk Inventor*, até ser possível gerar um sólido 3D. No entanto, na importação do ficheiro com o quadro, do programa CAD para o de análise pelo método dos elementos finitos, foi detetado mais um erro no modelo, desta vez ao nível do contacto. De forma mais precisa, não existia contacto entre os *dropouts* traseiros e os tubos do quadro a que deviam estar ligados, na sua parte superior e inferior (ao *seat stay* e ao *chain stay*, respetivamente). A Figura 4.1(a) mostra o resultado da aplicação do peso próprio à estrutura, impondo que a zona do eixo traseiro está fixa, de modo a ilustrar a deteção deste problema. A Figura 4.1(b) apresenta o detalhe no programa de CAD da zona do *dropout* que apresenta problemas de ligação. Para proceder

à correção deste erro de modelação, foi necessário eliminar a folga existente entre os *dropouts* e os tubos, em ambiente CAD (ver Figura 4.2), recorrendo à funcionalidade *sweep* para preencher o espaço entre estes dois elementos, conforme ilustrado na Figura 4.3.

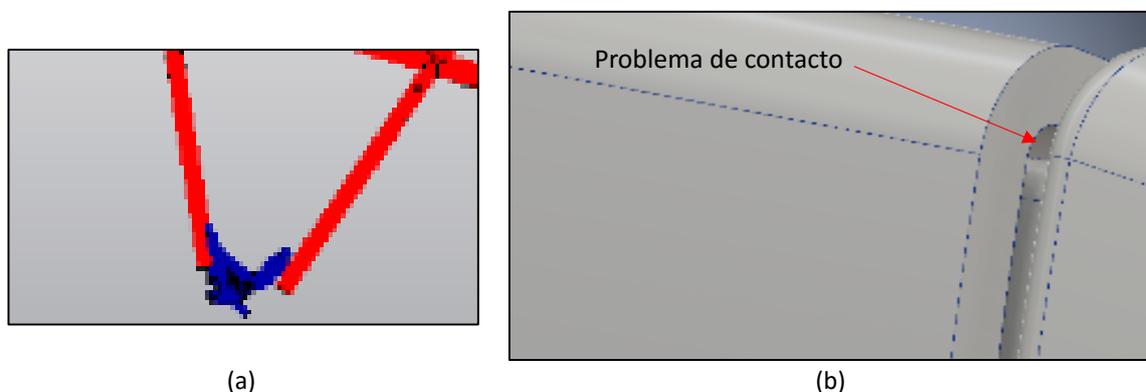


Figura 4.1. (a) Separação entre os *dropouts* e os elementos estruturais a que deviam estar ligados, (b) problema de contacto responsável pela separação entre os *dropouts* e os elementos estruturais a que deviam estar ligados.

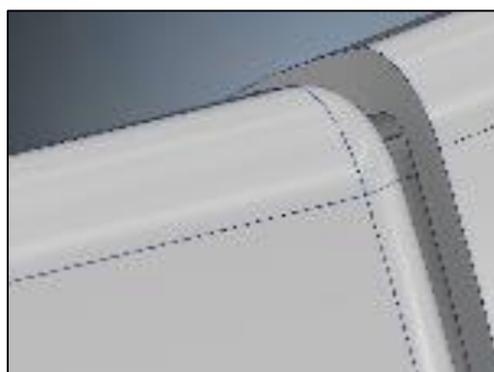


Figura 4.2. Problema de contacto resolvido.

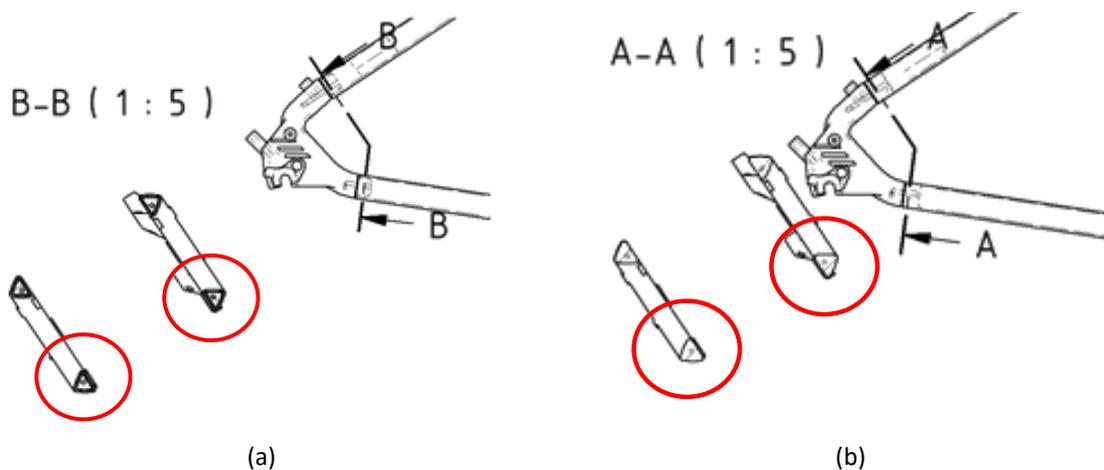


Figura 4.3. Ligação entre os *dropouts* e os restantes elementos do quadro. Detalhe da zona com problemas de ligação (assinalado com o círculo vermelho): (a) antes e (b) depois da reparação.

4.2. Modelos numéricos

O primeiro passo após a importação do modelo é a geração de malha de elementos finitos para todos os componentes dos vários ensaios. Foram utilizados elementos do tipo sólido: hexaédricos e tetraédricos (*Bricks and tetrahedra*), lineares, com 8 e 4 nós, respetivamente.

A definição do material pode ser realizada em qualquer um dos programas, sendo que o *Autodesk Simulation Mechanical* permite uma definição mais completa. Em ambos, a seleção do material pode ser feita a partir da base de dados. No entanto, a base de dados associada ao *Autodesk Simulation Mechanical* é mais completa, uma vez que permite a definição de diferentes modelos constitutivos para os materiais incluindo comportamento elastoplástico. A seleção do modelo constitutivo é realizada no menu *Element definition*, sendo que o modelo selecionado por defeito é elástico e isotrópico. No caso em estudo, o quadro será fabricado numa liga de alumínio 6061, à qual será aplicada um tratamento térmico do tipo T4 (com envelhecimento natural) ou T6 (com envelhecimento artificial). É expectável que ocorra deformação plástica no quadro nos ensaios mecânicos previsto pela norma, pelo que é necessário alterar o modelo constitutivo deste componente. Neste caso optou-se por seleccionar para a componente plástica da deformação o modelo *von Mises with isotropic hardening*, que permite definir as propriedades mecânicas indicadas na Tabela 4.1. Este modelo assume que o comportamento plástico é isotrópico e que o encruamento é linear, como se mostra na Figura 4.4, para os dois tratamentos térmicos. Observa-se que a liga 6061-T4 apresenta uma tensão limite de elasticidade de aproximadamente metade da liga 6061-T6. No entanto, o parâmetro de encruamento da liga 6061-T4 é sensivelmente 50% superior ao da liga 6061-T6, o que corresponde a uma taxa de encruamento mais acentuada. Importa realçar que o *Autodesk Simulation Mechanical* permite definir modelos mais complexos, mas tal exige a definição pelo utilizador dos parâmetros (e.g. curva tensão-deformação obtida experimentalmente).

Para todos os outros componentes auxiliares ao ensaio, em que não é especificado o material na norma ISO 4210, foi considerado o modelo constitutivo por defeito, com as propriedades elásticas definidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Propriedades elásticas e plásticas da liga de alumínio 6061.

	6061-T4	6061-T6
Densidade, ρ (Ns ² /mm/mm ³)	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-9}$
Módulo de elasticidade, E (N/mm ²)	68900	68900
Coefficiente de Poisson, ν	0,33	0,33
Parâmetro de encruamento, K(N/mm ²)	440,58	293,12
Tensão limite de elasticidade, σ_y (N/mm ²)	145	276

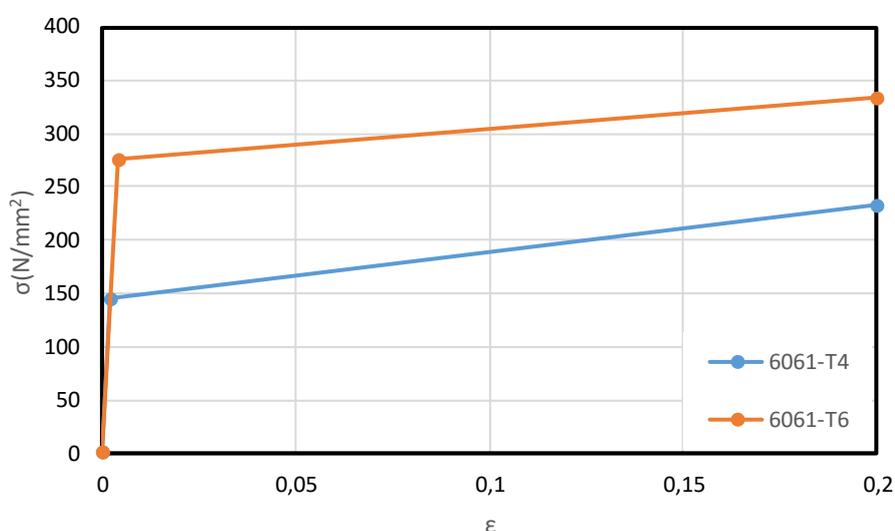


Figura 4.4. Curva tensão-deformação para a liga de alumínio 6061, com os tratamentos T4 e T6.

4.2.1. Ensaio de impacto – massa em queda livre

Relativamente às condições de fronteira, como descrito na secção 2.1, é necessário fixar o quadro pelo eixo traseiro. No entanto, de modo a simplificar o modelo, o eixo traseiro não foi utilizado. A condição de fronteira foi aplicada diretamente nas superfícies nos *dropouts* traseiros que estariam em contacto com o eixo, como se mostra na Figura 4.5.

De modo a evitar movimentos do quadro e dos restantes componentes numa direção que não seja a vertical, verificou-se a necessidade de restringir o movimento do eixo dianteiro, de modo a que este se desloque apenas ao longo do eixo dos ZZ (ver Figura 4.6). Importa realçar que esta condição não está explícita nas normas, mas foi suportada nas observações realizadas durante a visita às instalações de testes da ABIMOTA.

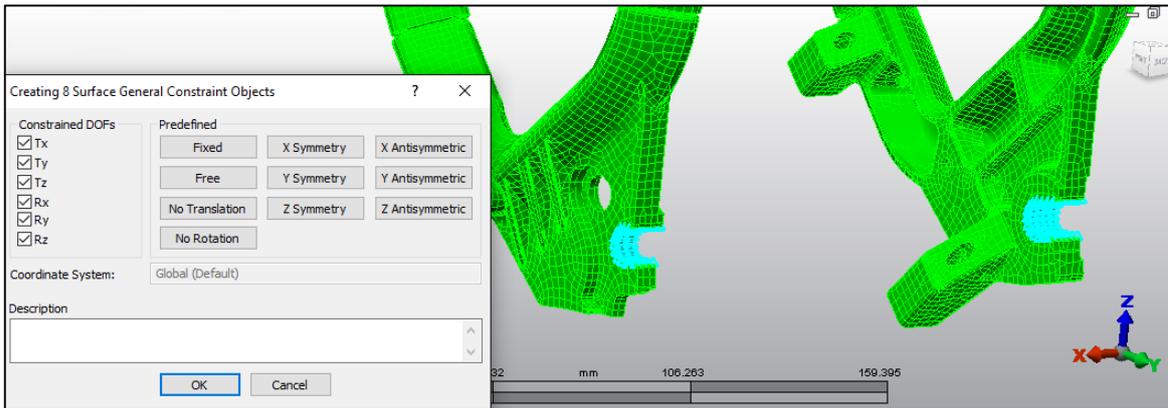


Figura 4.5. Condição de fronteira aplicada nos *dropouts* traseiros.

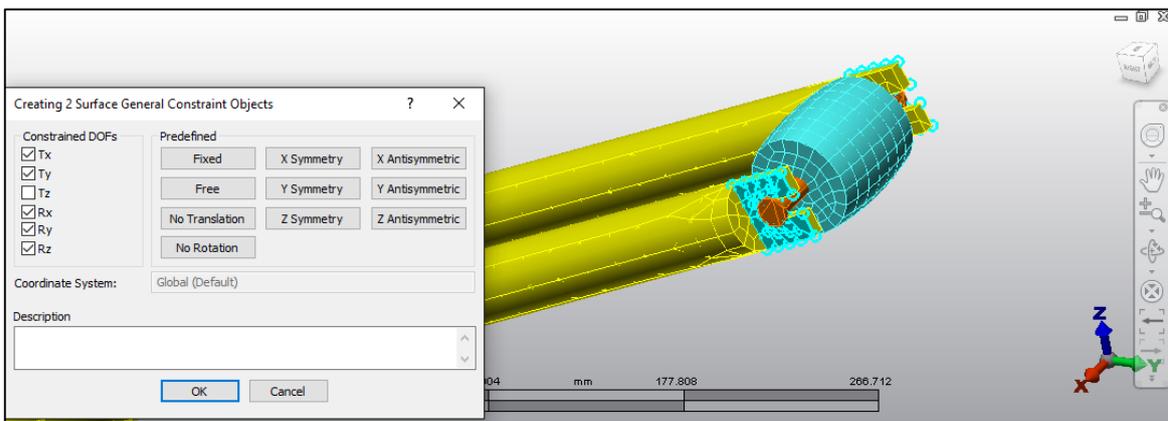


Figura 4.6. Condição de fronteira aplicada nos *dropouts* dianteiros.

Da mesma forma, pretende-se que a massa de impacto apenas se desloque em queda livre, por intermédio da força da gravidade. Assim, deve ser aplicada a mesma condição de fronteira, que permite apenas o movimento da massa ao longo do eixo dos ZZ , como se mostra na Figura 4.7.

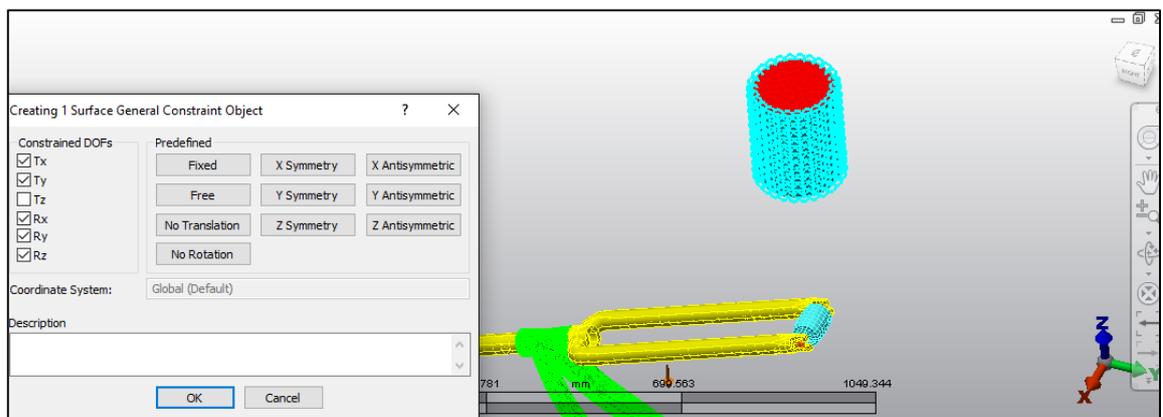


Figura 4.7. Condição de fronteira aplicada à massa de impacto.

Como se pretende que ocorra impacto entre a massa e o rolo da forqueta dianteira, deve ser definida a condição de contacto entre as duas superfícies potenciais de contacto destes componentes. O tipo de problema de contacto deve ser selecionado nas definições como *High Speed Contact (Impact)*, uma vez que o *Low Speed Contact (Press fit)* apenas permite o deslizamento relativo das superfícies. O método de contacto adotado é sem atrito, uma vez que corresponde a condições ideais. Em relação ao tipo de contacto, a seleção da opção *Automatic*, averigua qual o método mais indicado, sendo que por defeito assume o algoritmo *point to surface*. A Figura 4.8 apresenta o menu de seleção das superfícies potenciais de contacto.

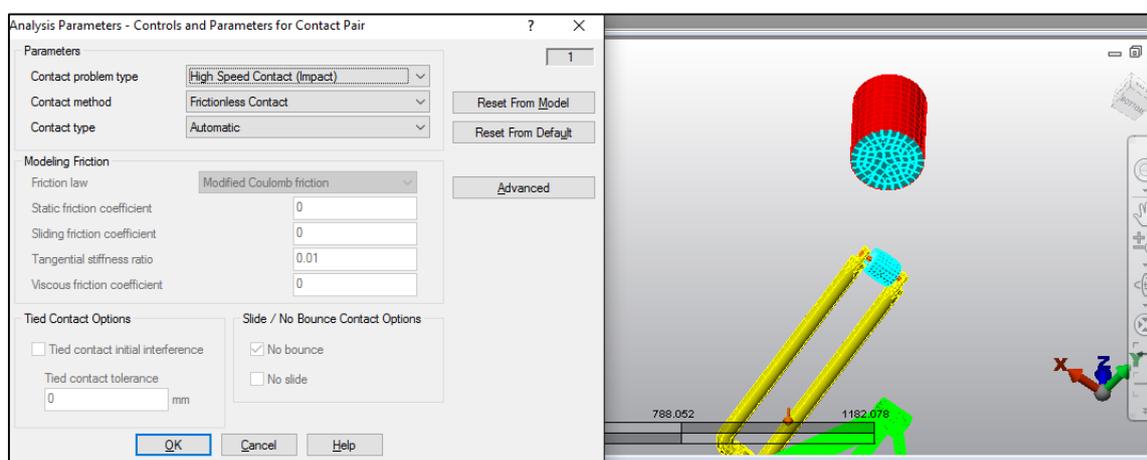


Figura 4.8. Contacto entre a massa de impacto e o rolo da forqueta.

Nos parâmetros de processo é necessário definir os aspetos relacionados com a duração da simulação, o número de incrementos, e as condições de carga. Para este ensaio, de modo a ocorrer o impacto e a massa ressaltar, até estabilizar em cima do rolo da forqueta dianteira, foi estabelecida uma duração total de 5 segundos (s). Como os parâmetros de defeito do programa se resumem a uma duração de 1s com um total de 20 incrementos optou-se por extrapolar este valor para os 5s determinados, o que dá um total de 100 incrementos, como se mostra na Figura 4.9 (a). Estas opções correspondem à predefinição de um tamanho de incremento de 0,05s.

A única condição de carga a ter em conta nesta análise é a força da gravidade, que pode ser determinada automaticamente pelo programa, com base na aceleração da gravidade. Dada a questão das unidades referida anteriormente, o valor da aceleração da

gravidade deve ser definido em mm/s^2 , i.e. 9814,56 como se mostra na Figura 4.9 (b). De notar que nas unidades SI, o valor *standard* assumido pelo programa é de $9,81456\text{m/s}^2$.

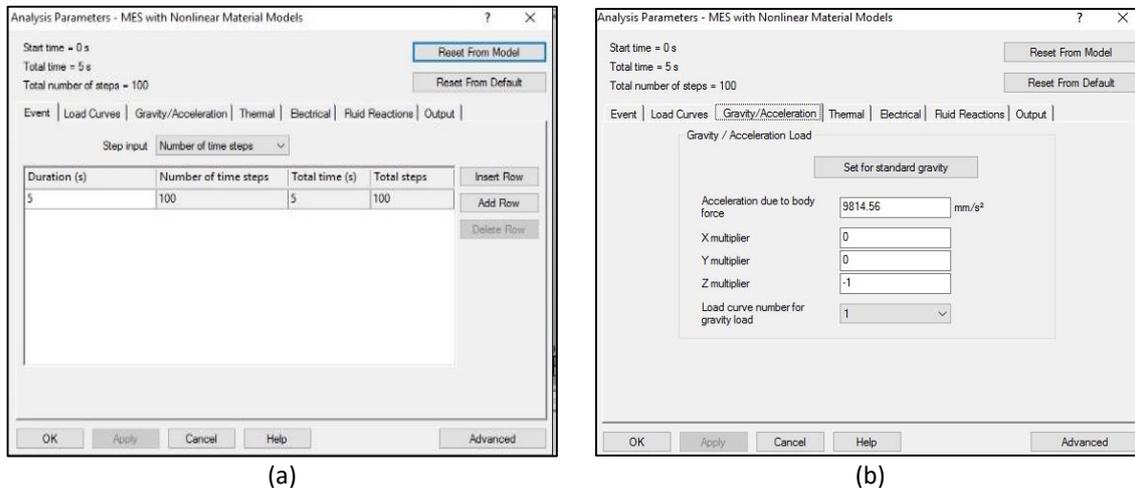


Figura 4.9. Parâmetros relacionados com a: (a) duração da simulação, (b) gravidade.

A força de gravidade foi aplicada no sentido descendente, ao longo do eixo dos ZZ (no sentido vertical). A Figura 4.10 apresenta a janela de condições de carga, onde se mostra que é possível definir o tempo de aplicação e a respetiva magnitude, para diferentes instantes da simulação. Neste ensaio foi atribuída uma curva de carregamento para a gravidade que garante que esta está sempre presente, ao longo da realização do ensaio, com um valor constante, correspondente ao parâmetro de multiplicação de 1, entre o instante inicial (0s) e final (5s).

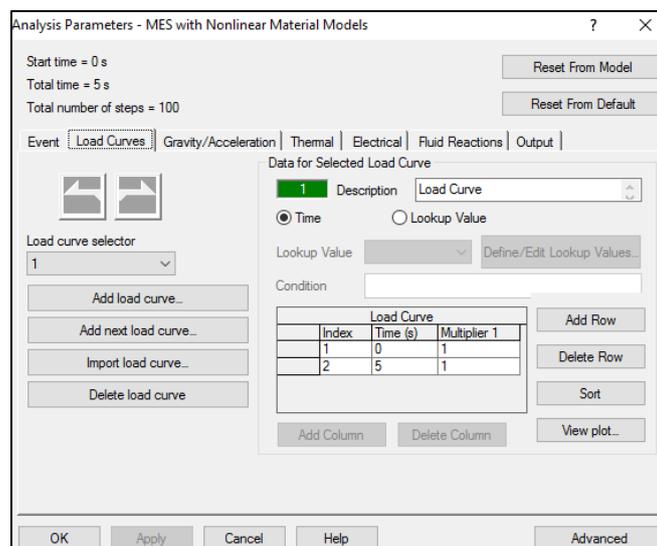


Figura 4.10. Parâmetros relacionados com o carregamento.

Conforme já foi referido no subcapítulo 3.1, quando se pretende um valor específico de massa para um componente, este pode ser definido através do produto do seu volume pela densidade do material utilizado. No entanto, no programa *Autodesk Simulation Mechanical* as unidades assumidas para a densidade são $\text{Ns}^2/\text{mm}/\text{mm}^3$. Uma vez que a norma ISO 4210 especifica as massas em kg, importa referir a seguinte conversão de unidades:

$$\frac{\text{Ns}^2/\text{mm}}{\text{mm}^3} = 10^{12} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (4.1)$$

Desta forma ficam definidas todas as condições para a realização do ensaio no *software* de análise de elementos finitos.

4.2.2. Ensaio de impacto – quadro em queda

O procedimento é semelhante ao descrito na seção anterior, sendo que a primeira etapa é a geração de malha para os diversos componentes, seguida pela definição do material do quadro. A aceleração da gravidade é definida da mesma forma que no ensaio de impacto de massa em queda, assim como os parâmetros de processo associados à duração do ensaio.

Em relação às condições de fronteira, o cenário é bastante diferente do ensaio anterior. Pretende-se que o quadro rode em torno do seu eixo traseiro, pelo que é necessário aplicar uma condição de fronteira nos *dropouts* traseiros que permita somente esta rotação, i.e. rotação livre apenas em torno do eixo dos YY. Porém, a realização da simulação com estas condições de fronteira permite verificar que, ao não permitir a translação dos nós dos *dropouts* traseiros, a rotação ocorre na direção pretendida apenas até um certo limite. Este corresponde ao instante em que a resistência oferecida pelo material é tão elevada que o quadro inicia um movimento na direção oposta, razão pela qual esta solução foi abortada.

A alternativa para definir as condições de fronteira corretas exige a montagem do eixo traseiro (ver Figura 3.13). Neste caso, é possível aplicar a mesma condição de fronteira ao eixo, i.e. rotação livre apenas em torno do eixo dos YY. No entanto, ao garantir o contacto rígido (*bonded*) entre o eixo e os *dropouts*, surge o mesmo problema. Assim, explorou-se a aplicação de uma outra condição de fronteira em que o eixo passa a estar fixo, e o tipo de contacto com a superfície dos *dropouts* traseiros do quadro permite deslizamento sem atrito entre os dois componentes, i.e. eixo e *dropout* traseiro. Com isto, pretendia-se que o quadro rodasse sobre o seu eixo traseiro, em torno do eixo fixo. A adoção desta solução

permitiu resolver o problema da translação, pelo que o quadro roda livremente em torno do eixo, tal como é necessário. Porém, assim que se deu o primeiro impacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço, ocorreu também o ressalto da traseira do quadro. De facto, dado que existe somente deslizamento entre o eixo traseiro e os *dropouts*, o impacto gera um afastamento entre estes componentes, de modo que os *dropouts* perdem o contacto com o eixo (ver Figura 4.11).

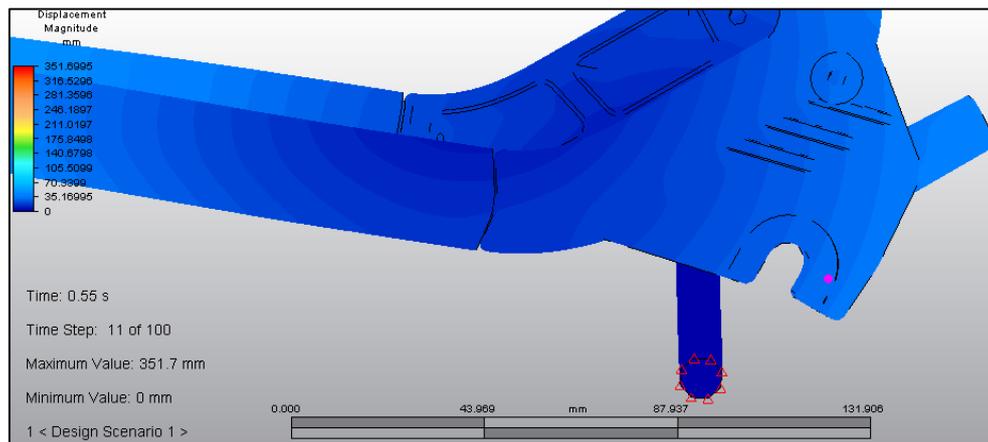


Figura 4.11. Afastamento entre o *dropout* e eixo traseiro devido ao impacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço.

Assim, surgiu a ideia de acoplar ao eixo traseiro dois componentes circulares, de diâmetro interno igual ao do eixo. Estes componentes foram colocados nas extremidades do eixo, como se mostra na Figura 4.12. A incorporação destes elementos permite aplicar uma condição de fronteira, que garante que ficam fixos (ver Figura 4.12) durante todo o ensaio. Desta forma, o eixo é fixo ao quadro e ocorre deslizamento sem atrito entre o eixo e os componentes circulares, o que permite que ocorra a rotação do quadro. Os componentes circulares são os suportes do eixo traseiro, que foram descritos no subcapítulo 3.2.

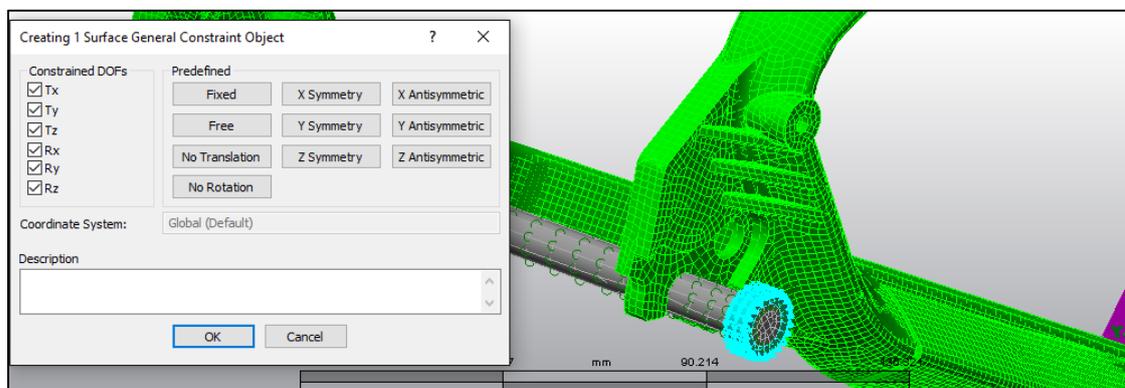


Figura 4.12. Condição de fronteira aplicada aos suportes do eixo traseiro.

Conforme foi referido, entre os suportes e o eixo foi estabelecido um tipo de contacto entre superfícies, que é definido no *software* de análise de elementos finitos como do tipo “*Low Speed Contact (Press-Fit)*” que garante que não há atrito, como se mostra na Figura 4.13. Este tipo de contacto é adequado à situação em análise, em que se pretende que ocorra apenas rotação entre o eixo e os componentes circulares. Uma vez que há contacto sem atrito em relação aos suportes, por uma questão de segurança, foi imposta uma condição de fronteira no eixo traseiro de modo a que o movimento ao longo do eixo dos YY seja restringido, conforme se pode ver na Figura 4.14.

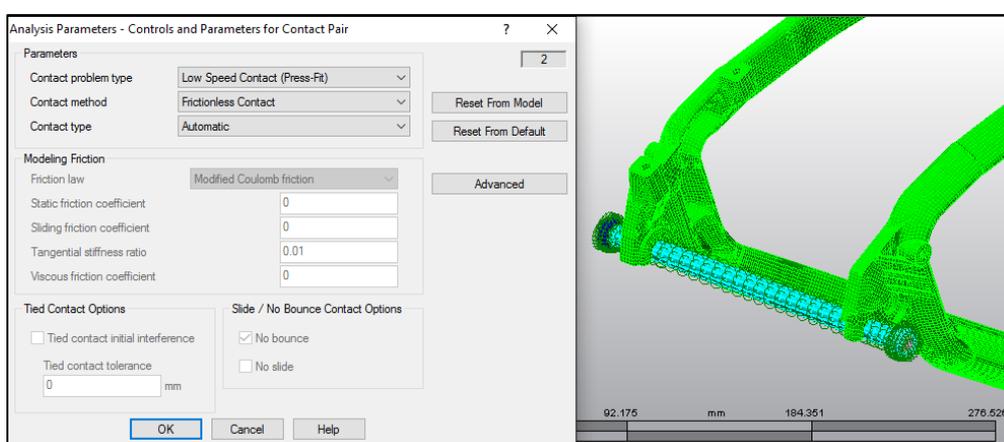


Figura 4.13. Definição do tipo de contacto entre o eixo traseiro e os seus suportes.

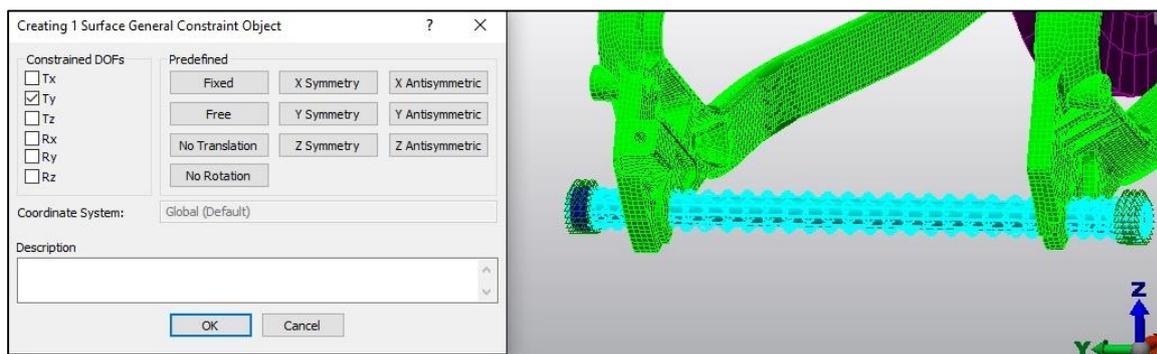


Figura 4.14. Condição de fronteira aplicada ao eixo traseiro.

Ao bloco de aço foi imposta uma condição de fronteira que garante que este está fixo, como se mostra na Figura 4.15. De modo a garantir o impacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço é necessário definir o contacto entre superfícies. À semelhança do que foi definido para a massa no ensaio de impacto de massa em queda (ver subcapítulo

4.2.1), este contacto será do tipo “*High Speed Contact (Impact)*”, conforme está ilustrado na Figura 4.16.

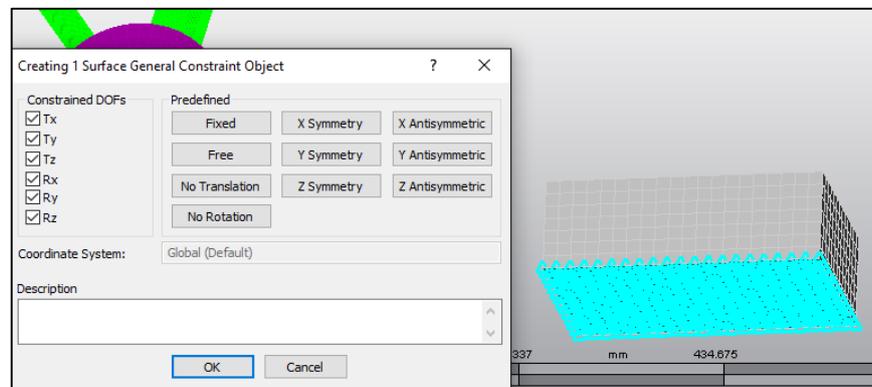


Figura 4.15. Condição de fronteira aplicada ao bloco de aço.

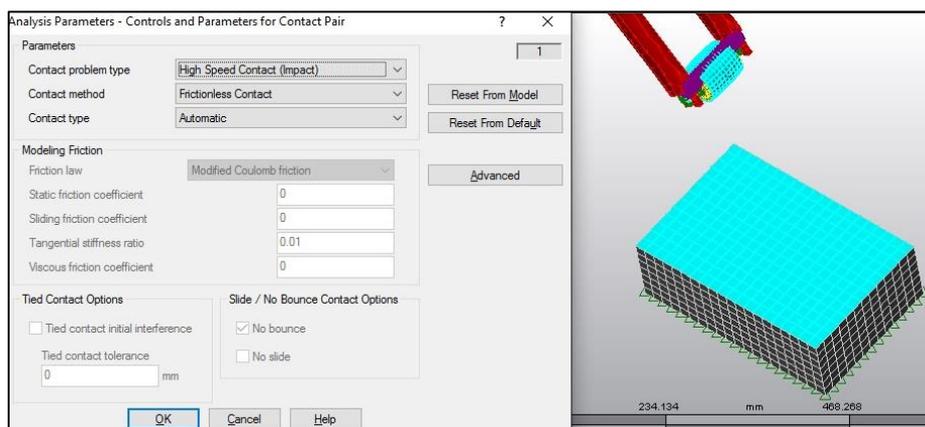


Figura 4.16. Definição do tipo de contacto entre o rolo da forqueta dianteira e o bloco de aço.

Uma particularidade deste ensaio, descrita no subcapítulo 2.2, é o facto de o quadro ter de ser erguido para a altura inicial após o primeiro impacto e sucessivos ressaltos. Para realizar este procedimento, utilizou-se a funcionalidade “*Prescribed displacement*”, aplicada ao eixo do rolo da forqueta, de modo a garantir que a distância entre o ponto mais baixo do rolo da forqueta distava 300mm do bloco de aço, tal como no início do ensaio. No *Autodesk Simulation Mechanical*, este deslocamento prescrito é definido de forma semelhante a uma força. Ao seleccionar a superfície de aplicação da força, aparece um menu onde é feita a definição dos parâmetros do deslocamento. Tal como se mostra na Figura 4.17, foi definido que o deslocamento ocorre entre os 2 e 2,5s. O instante inicial de 2s foi

determinado de modo a dar tempo para ocorrer o impacto inicial, e sucessivo ressalto. O tempo total de duração desta etapa não deve ser demasiado reduzido face ao valor total de deslocamento, pois pode originar a redução excessiva do incremento de tempo, até ao limiar admissível, o que resulta na paragem automática.

De notar, que a dimensão de defeito do incremento é imposta pelo utilizador quando define o tempo total e o número de incrementos (ver Figura 4.9 a)). No entanto, nem sempre será possível convergir para o valor de defeito imposto pelo utilizador. De modo a evitar a paragem, o *Autodesk Simulation Mechanical* procede à redução automática do tamanho do incremento, para metade do valor anterior. No entanto, este procedimento é repetido de forma sequencial no máximo 20 vezes. Caso seja atingido este nível de redução do tamanho de incremento a simulação para.

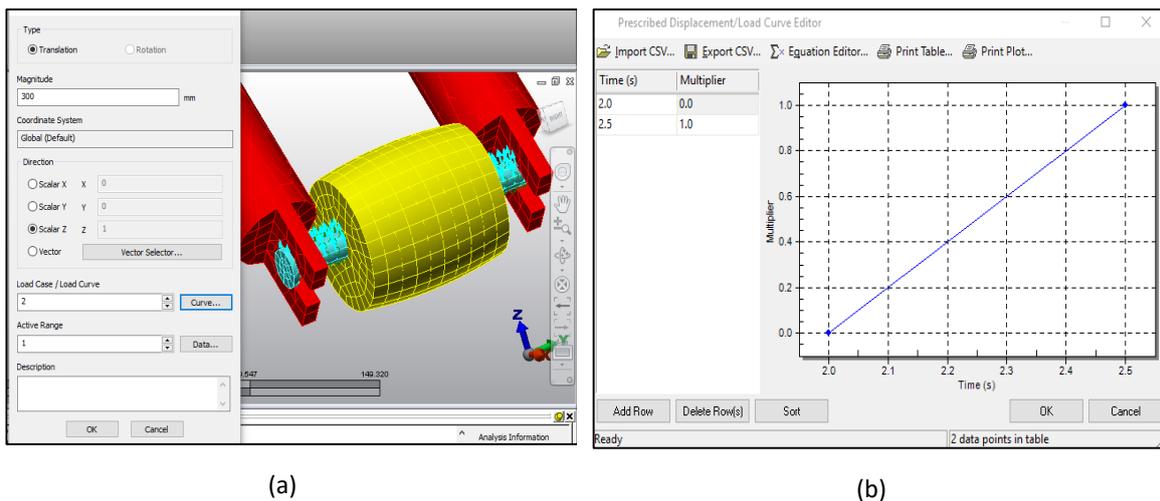


Figura 4.17. Definição do deslocamento prescrito: (a) seleção da superfície e (b) da curva de aplicação.

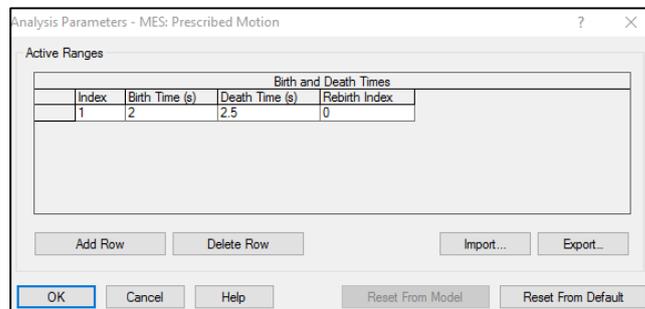


Figura 4.18. Definição das condições de ativação da aceleração da gravidade.

Quando o “*Prescribed displacement*” está ativo, as condições de carga impostas (como, por exemplo, a gravidade) ficam inativas. Assim, é necessário definir um parâmetro de controlo para garantir esta condição, denominado “*Active Range*” (ver Figura 4.18). Foi definido que o início (*Birth Time*) e fim (*Death Time*) da aplicação deste parâmetro coincidem com o tempo de duração de aplicação do deslocamento, para que no restante tempo de ensaio a aceleração da gravidade esteja ativa.

O reposicionamento do quadro impõe um deslocamento que implica o movimento rápido de um elevado número de nós. Tendo em conta o facto de se estar a usar uma malha algo refinada (aproximadamente 300000 nós), o reposicionamento dá origem a tempos de cálculo muito elevados, associado a um incremento de tempo muito pequeno. De facto, na simulação em que se incorporou este parâmetro, detetou-se o nível de redução 10 que corresponde a um tamanho de incremento de 0,000098s. Assim, ao fim de duas semanas esta simulação não tinha chegado a metade do progresso total. Por esta razão, na análise de resultados, foi considerado somente o primeiro impacto.

4.3. Resultados numéricos

As simulações numéricas foram realizadas em dois computadores cujas especificações são apresentadas na Tabela 4.2. Esta decisão foi tomada por forma a diminuir o tempo de espera para obtenção de resultados nas simulações numéricas. De notar que apesar de os computadores terem frequências de relógio idênticas, o computador PC2 apresenta 6 *cores*, enquanto o PC1 conta apenas com 4, o que se traduz numa vantagem nos tempos de cálculo das simulações numéricas realizadas no PC2.

Tabela 4.2 Especificações dos computadores utilizados nas simulações numéricas.

	PC1	PC2
CPU	Intel® Core™ i7 2600k	Intel® Core™ i7 5930k
Velocidade do CPU	3,4GHz	3,5GHz
Número de <i>cores</i>	4	6
RAM	8GB	64GB
Placa gráfica	AMD Radeon HD 5670	NVIDIA GeForce GT 720

4.3.1. Ensaio de impacto de massa em queda

Para este ensaio, inicialmente foi utilizada uma forqueta de menor dimensão (*axle to crown*, $L_{ac}=360\text{mm}$) do que a selecionada com base na pesquisa realizada (ver subcapítulo 3). De modo a perceber de que forma os resultados podem ser afetados pela variação da dimensão deste componente, foi realizada a medição inicial, estática, para ambos os casos, e para a liga de alumínio 6061-T6. Nesta secção a forqueta de menor dimensão será designada por inicial e a de maior por final. Como se mostra na Figura 4.19, foram retirados os dados relativos ao deslocamento do eixo dianteiro, ao longo do eixo dos ZZ, assim com a força exercida pela massa no ponto de contacto com o rolo da forqueta dianteira.

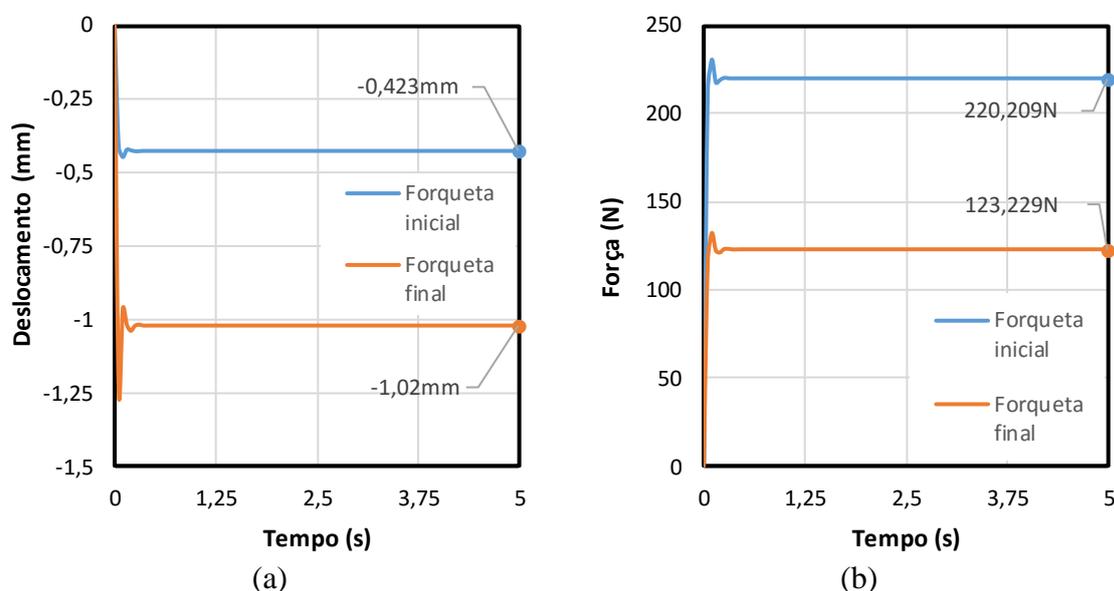


Figura 4.19. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ (a) e força nodal máxima exercida pela massa no rolo da forqueta (b).

Na Figura 4.19(a) observa-se que a utilização de uma forqueta de maior dimensão coloca o quadro numa situação mais desfavorável, uma vez que a magnitude do deslocamento é maior. Este resultado está de acordo com o previsto aquando do desenho da forqueta de testes, conforme descrito no subcapítulo 3. Em relação à evolução da força máxima exercida pela massa de impacto no rolo da forqueta, apresentada na Figura 4.19(b), o resultado é algo inesperado no caso da forqueta final. Do ponto de vista teórico, e atendendo à 2ª lei de Newton, tem-se:

$$F = ma, \quad (4.2)$$

sendo F a força, m a massa e a a aceleração. Tendo em conta o valor de 22,5kg descrito na norma ISO 4210 para a massa de impacto e a aceleração da gravidade com um valor de $9,81456\text{m/s}^2$, definido no *software Autodesk Simulation Mechanical*, obtém-se:

$$F = 22,5 \times 9,81456 = 220,82760 \text{ N.}$$

Este valor é idêntico ao obtido no ensaio estático para a forqueta inicial. Porém, no caso da forqueta final, o valor nodal máximo obtido é de aproximadamente metade. A origem desta discrepância pode estar associada à geração de malha, uma vez que no rolo da forqueta final, não está presente nenhum nó no seu plano de simetria, onde *a priori* é expectável que este estabeleça contacto com a massa de impacto. De facto, como se mostra na Figura 4.20, no caso da forqueta inicial existe um nó único de contacto, situado no plano de simetria do rolo.

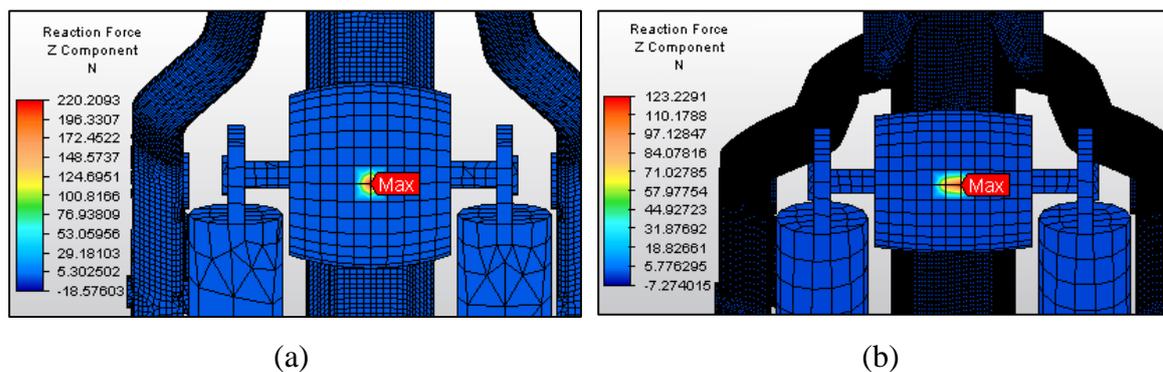


Figura 4.20. Malha gerada no rolo da forqueta inicial (a) e final (b).

Tal como foi referido no subcapítulo 4.2.1, por predefinição, no *software* de simulação numérica utilizado é selecionado o algoritmo de contacto “*Point to Surface*”. Neste algoritmo, um corpo é definido como primário (também designado por *master*) e o outro como secundário (ou *slave*). O algoritmo “*Point to Surface*” deteta quando um nó do corpo secundário penetra uma superfície do corpo primário e reposiciona-o na superfície. No entanto, o inverso é permitido, i.e. a penetração de um nó do corpo primário numa superfície do corpo secundário é possível [4]. Para se fazer a correta definição do corpo *master* e *slave*, foram seguidas as recomendações usualmente adotadas [10]:

- A superfície de contacto que apresenta a malha mais refinada deve ser a *slave*, enquanto a superfície com a malha mais grosseira deve ser a *master*;

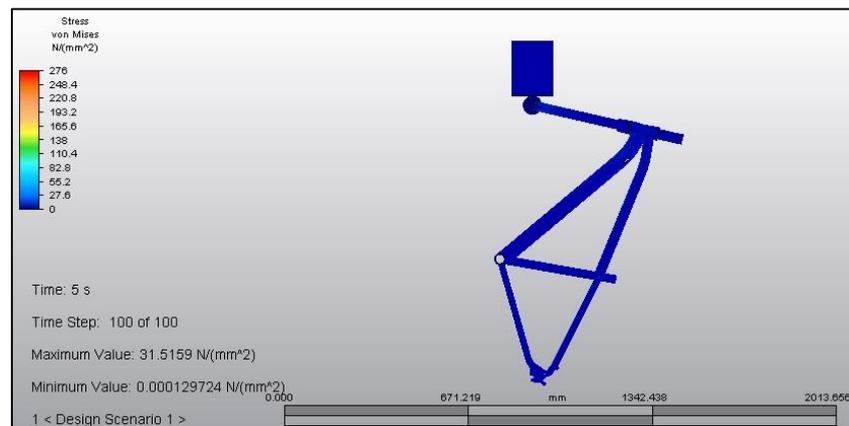
- Quando a rigidez entre os corpos em contacto é diferente, a superfície de contacto do corpo mais rígido deve ser a *master*, e a outra deve ser definida como *slave*;
- Quando o contacto ocorre entre um corpo deformável e um corpo rígido, as superfícies do corpo rígido devem ser especificadas como *master*;
- No caso do contacto entre uma superfície convexa com uma superfície plana ou côncava, a superfície *master* deve ser a plana/côncava;
- Se um corpo desliza sobre outro com uma superfície de contacto consideravelmente maior, a superfície de maiores dimensões deve ser a *master*, de modo a minimizar as variações no estatuto de contacto.

Neste caso, a seleção do rolo como *slave* e da massa de impacto como *master* garante o cumprimento destas recomendações, com exceção da primeira, uma vez que a malha foi gerada automaticamente. Para evitar os problemas associados à geração de malha, pode ser adotada uma das seguintes soluções. A primeira é garantir a existência de um nó no plano de simetria do rolo, definindo a posição geométrica dos planos de simetria. A segunda passa pela utilização do tipo de contacto “*Surface to Surface*”. Este algoritmo deteta quando um nó de qualquer um dos corpos penetra na superfície do outro e procede ao seu reposicionamento, i.e. ambos são tratados como *slave*. Porém, importa realçar que a adoção do tipo de contacto “*Surface to Surface*” resulta num forte aumento do tempo de cálculo, uma vez que este algoritmo é mais complexo.

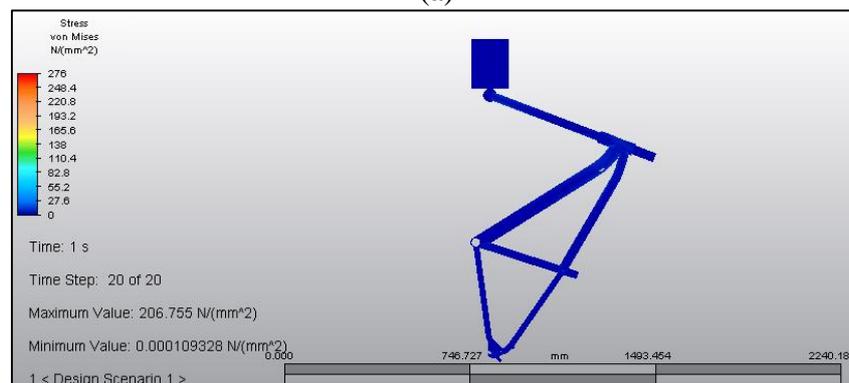
A distribuição da tensão equivalente (von Mises) no final do ensaio estático é ilustrada na Figura 4.21(a) para a forqueta inicial e (b) para a final. Em ambos os casos, as deformações nesta medição inicial estão no domínio elástico, i.e. a tensão máxima no quadro é inferior à tensão limite de elasticidade do material, que é de 276N/mm^2 (ver Tabela 4.1). No entanto, a influência da dimensão da forqueta é notória no valor máximo atingido, uma vez que na forqueta final este é cerca de 6,5 vezes superior. Este resultado é consistente com o aumento do braço de aplicação da força, devido ao aumento da dimensão *axle to crown* da forqueta, dos 360mm do componente inicial para os 509mm do final.

Para o modelo com a forqueta final, foi realizada uma nova simulação estática em que se utilizou uma malha mais grosseira para os componentes auxiliares de ensaio (ou seja, todos exceto o quadro) de modo a averiguar o impacto da utilização de uma malha menos refinada. Na Figura 4.22 apresenta-se a comparação da evolução do deslocamento do

eixo dianteiro, obtido para estas simulações numéricas, bem como o resumo dos dados do modelo numérico. Realça-se um aspeto de extrema relevância a ter em conta: a simulação com malha mais refinada foi efetuada no computador PC2, com uma capacidade de processamento superior ao PC1, onde correu a simulação com a malha mais grosseira (ver Tabela 4.2).



(a)

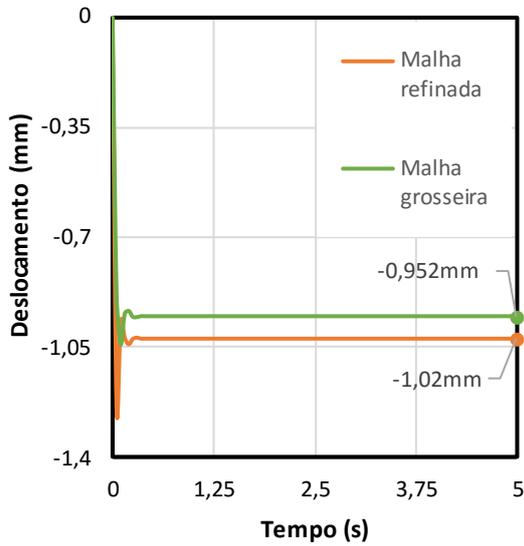


(b)

Figura 4.21. Tensão equivalente (von Mises) exercida no quadro, com a forqueta inicial (a) e com a forqueta final (b).

Da análise da Figura 4.22(a) observa-se uma pequena diferença no deslocamento, na ordem das centésimas de milímetro ($\sim 7\%$). Porém, a diferença em termos de tempo de cálculo revela que a utilização da malha mais grosseira é bastante vantajosa. É preciso ter em conta que este ensaio é somente um ensaio estático, pelo que o efeito do refinamento da malha seria bem mais notório no tempo de cálculo de um ensaio dinâmico. No caso de ambas as simulações serem realizadas no mesmo computador, existirá uma diferença ainda mais acentuada nos tempos de cálculo. Por último, estas simulações foram realizadas considerando que o quadro apresenta um comportamento elástico, o que também

contribui para tempos de cálculo inferiores aos expectáveis com o modelo elastoplástico. Por estas razões, optou-se pela utilização da malha mais grosseira na realização dos ensaios dinâmicos.

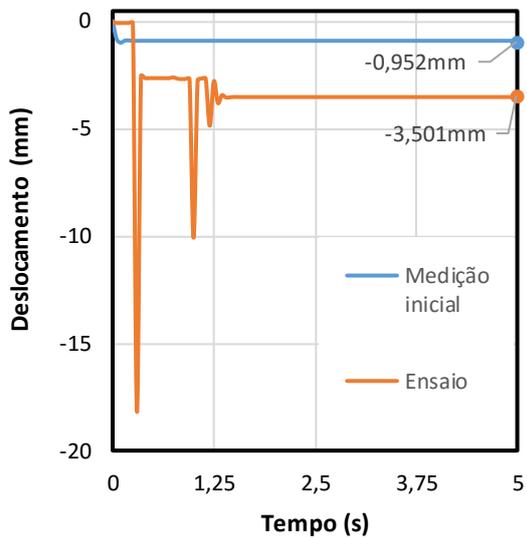


	Malha refinada	Malha grosseira
Número de Nós	1 928 974	194 846
Número de Elementos	2 900 972	318 635
Tempo de cálculo	10h34m31s	06h52m41s

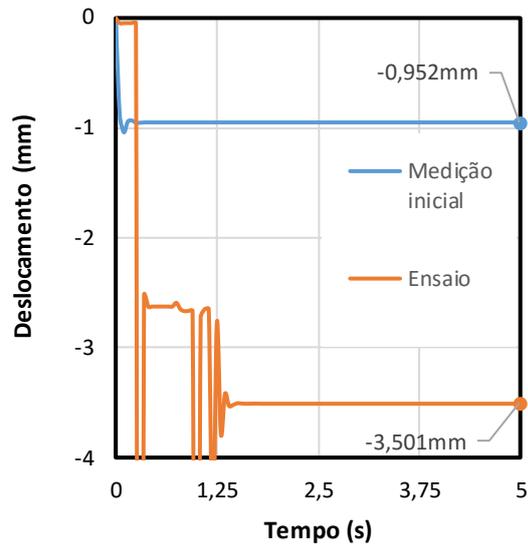
(a)

(b)

Figura 4.22. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ (a) e informações relativas às simulações numéricas (b).



(a)



(b)

Figura 4.23. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ para a liga com o tratamento térmico T4 (a) e vista pormenorizada do mesmo deslocamento (b).

Nos ensaios dinâmicos, foi considerada a liga de alumínio 6061 indicada pela empresa para o fabrico do quadro. Foram comparados quadros fabricados na totalidade com o tratamento térmico T4 e T6. Os resultados obtidos tanto para a medição inicial, em situação estática, como para o ensaio de impacto estão esquematizados na Figura 4.23 para a liga com tratamento térmico T4, e na Figura 4.24 para o tratamento térmico T6. Em relação à medição inicial os resultados são idênticos para os dois tratamentos térmicos porque, com base nos resultados obtidos anteriormente, optou-se por realizar a simulação estática considerando um comportamento elástico para o quadro.

A Figura 4.23(b) permite averiguar se os valores de deslocamento devido à deformação plástica do quadro se encontram dentro do estabelecido na norma ISO 4210 para a validação do quadro, conforme descrito no subcapítulo 2.1. A diferença obtida para os valores absolutos de deslocamento entre o ensaio e a medição inicial, é de $3,501 - 0,952 = 2,549\text{mm}$, valor que se encontra dentro do limite de 10mm estabelecido, pelo que se pode afirmar que o quadro está dentro dos requisitos da norma.

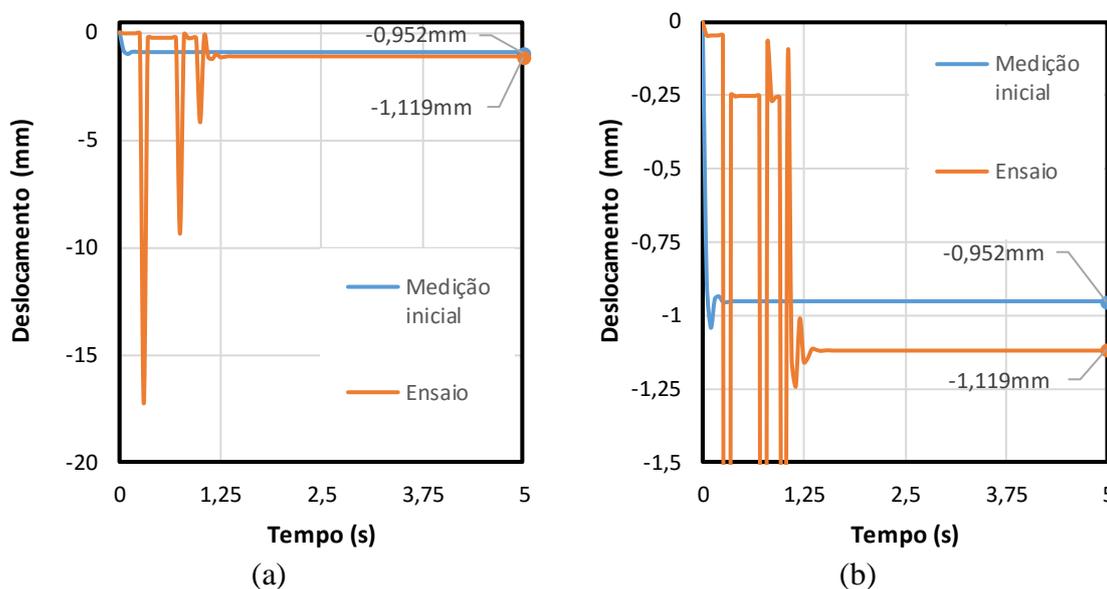


Figura 4.24. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos ZZ para a liga com o tratamento térmico T6 (a) e vista pormenorizada do mesmo deslocamento (b).

Da mesma forma, o valor de deslocamento devido à deformação plástica obtido para a liga com o tratamento térmico T6, com base nos valores apresentados na Figura 4.24(b), é de $1,119 - 0,952 = 0,167\text{mm}$. Este valor não só está dentro do limite de 10mm imposto pela norma, como é 15 vezes inferior ao valor de 2,549mm obtido para a liga com

o tratamento térmico T4. No entanto, importa referir que a simulação da situação inicial para o tratamento T4 apresenta valores máximos para a tensão de von Mises superiores à tensão limite de elasticidade (ver Tabela 4.1), pelo que é expectável que a diferença de deslocamento seja inferior a 2,549mm.

A diferença no deslocamento é coerente com as distribuições da tensão de von Mises apresentadas na Figura 4.25, para o instante correspondente ao primeiro impacto. Nesta figura observa-se a localização da deformação na zona de ligação entre o *head tube* e a forqueta, localização que é a expectável tendo em conta as condições de contacto impostas. A Figura 4.26 apresenta a distribuição da tensão de von Mises na zona de ligação entre o *head tube* e a forqueta, no final do ensaio. Observa-se que o valor máximo de deformação ocorre para a simulação realizada com o tratamento T4, sendo que o valor máximo da deformação plástica (5,7%) é aproximadamente o dobro da que ocorre para o tratamento T6 (3%).

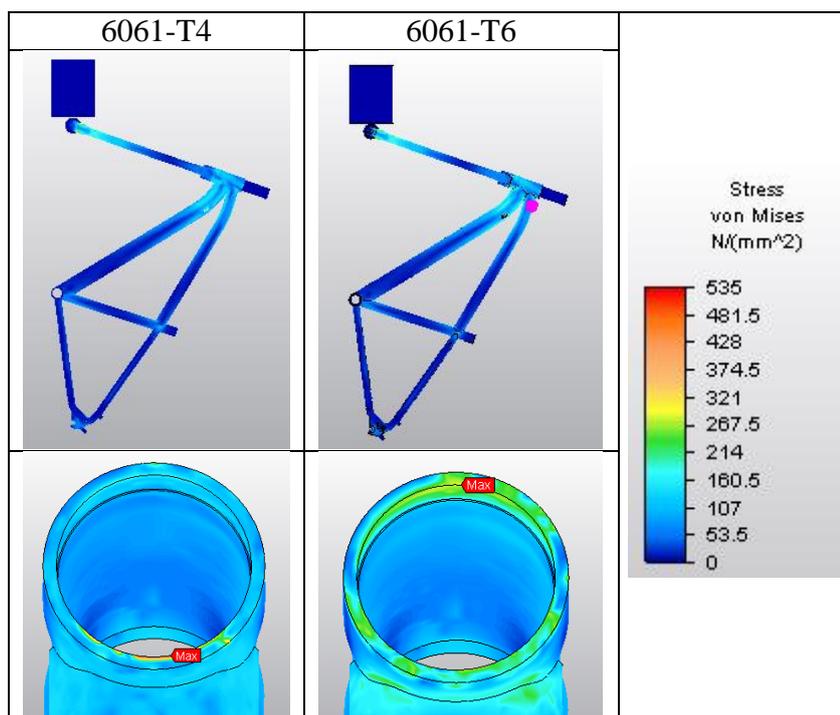


Figura 4.25. Distribuição da tensão de von Mises no quadro, para o instante correspondente ao primeiro impacto, incluindo detalhe da zona onde ocorre o valor máximo.

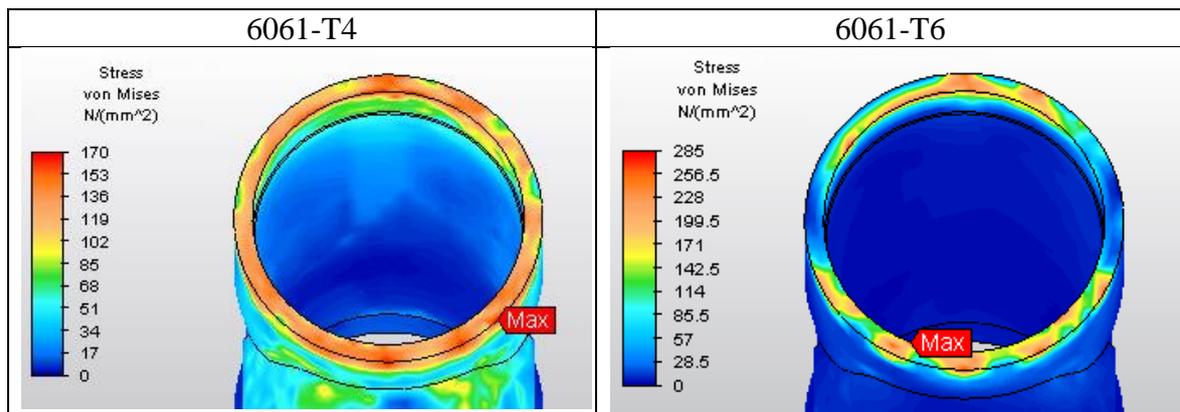


Figura 4.26. Distribuição da tensão de von Mises na zona onde ocorre o valor máximo, para o instante correspondente ao final do ensaio.

4.3.2. Ensaio de impacto de quadro em queda

Este ensaio foi inicialmente simulado considerando que todos os materiais dos componentes, incluindo o quadro, apresentam um comportamento linear elástico, de modo a validar as condições de fronteira. A Figura 4.27(a) apresenta a distribuição da tensão de von Mises no final do ensaio estático, sendo também neste caso evidente que o quadro apresenta tensões muito inferiores ao limite de elasticidade. Para o ensaio dinâmico observam-se valores máximos de tensão equivalente de aproximadamente 590 MPa, numa zona correspondente à ligação entre o *head tube* e a forqueta (ver Figura 4.27(b)). A realização destes ensaios permitiu validar as condições de fronteira e o procedimento de análise do deslocamento do eixo, como se mostra na Figura 4.28(a). No entanto, ao contrário do que seria expectável para ensaios no domínio elástico, no final dos ensaios o deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos XX é distinto, como se mostra nessa figura. Tal como foi mencionado no subcapítulo anterior, este facto está relacionado com as condições de contacto, uma vez que estas são muito sensíveis à discretização das superfícies. A geração automática de malha conduz a elementos finitos com dimensões muito distintas, como se mostra Figura 4.29, uma vez que no caso do ensaio estático o contacto existe para o instante inicial, ao contrário do que acontece no ensaio dinâmico.

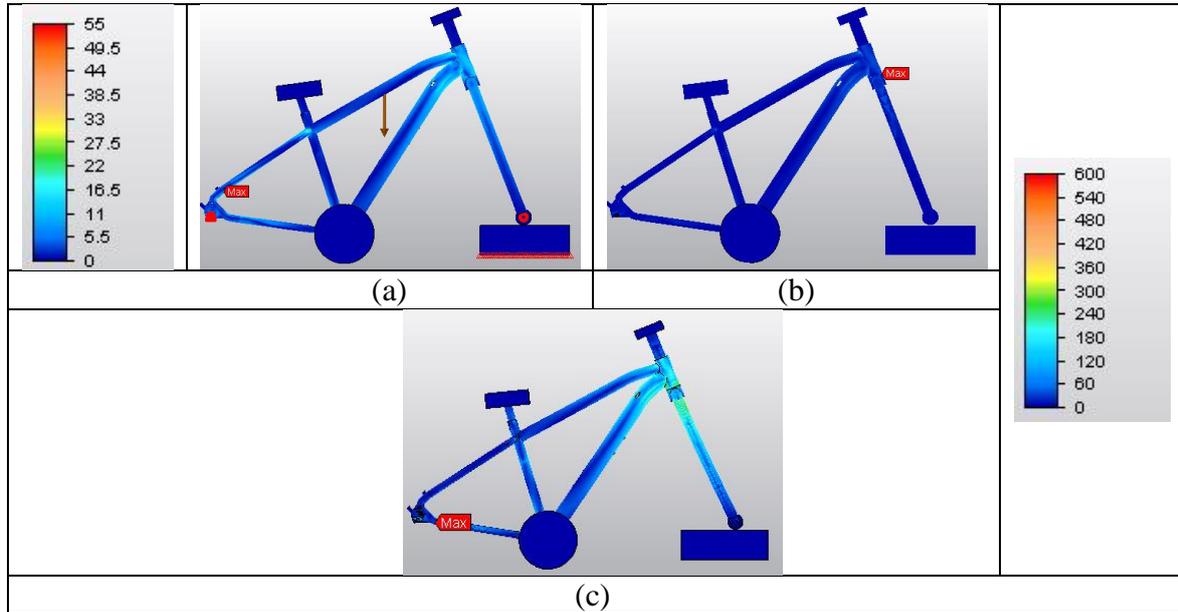


Figura 4.27. Distribuição da tensão de von Mises (MPa) no quadro, para o instante correspondente: (a) ao final do ensaio estático; (b) ao primeiro impacto do ensaio dinâmico, ambos para um material com comportamento linear elástico; (c) ao primeiro impacto do ensaio dinâmico, para o quadro da liga 6061-T6.

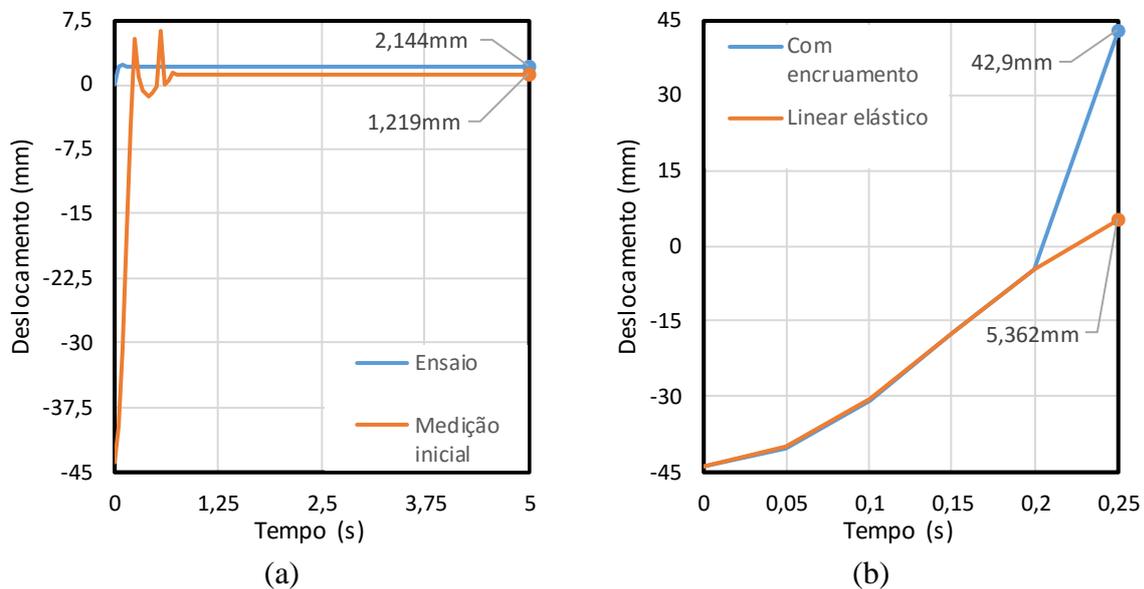


Figura 4.28. Deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos XX para um material linear elástico (a) e para um material elastoplástico (liga 6061-T6) (b).

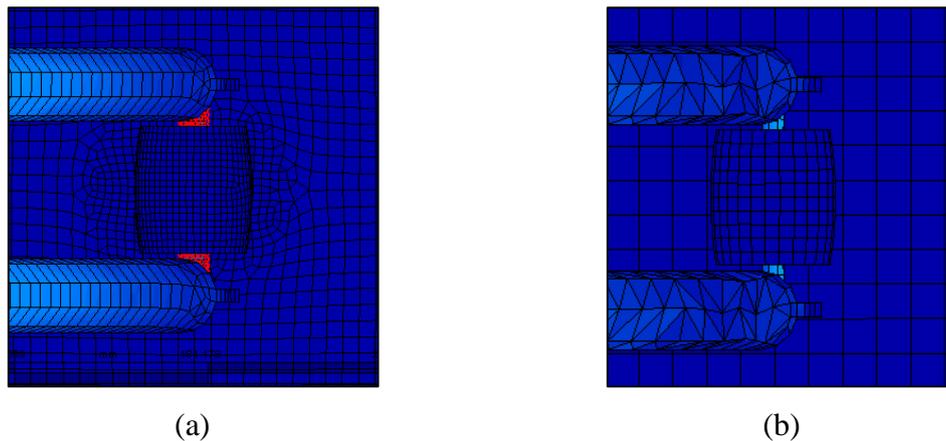


Figura 4.29. Malha gerada no rolo da forqueta e no bloco de aço: (a) ensaio estático (b) ensaio dinâmico.

A Figura 4.27(c) apresenta a distribuição da tensão de von Mises no final do primeiro impacto do ensaio dinâmico, com o quadro com propriedades plásticas correspondentes à liga 6061-T6. Observa-se uma maior variação da tensão de von Mises em todo o quadro, sendo os valores mais elevados nas zonas expectáveis de deformação. Este resultado está associado a um maior nível de deslocamento do eixo dianteiro ao longo do eixo dos XX, como se mostra na Figura 4.28(b). De facto, o valor do deslocamento aumenta cerca de 8 vezes. No entanto, importa referir que a geração automática da malha para o ensaio dinâmico conduziu também a problemas na zona dos *dropouts*, que originam valores de tensão máxima muito elevados. Na Figura 4.28(b) mostram-se os resultados do ensaio dinâmico realizado com o material elastoplástico apenas até ao instante correspondente a 0,25 s. Tal deve-se ao forte aumento do tempo de cálculo associado à adoção do modelo de comportamento elastoplástico. De facto, como se mostra na Figura 4.30 a introdução desta não linearidade material resulta numa forte redução do tamanho do incremento, associado a problemas de convergência. Na prática, a redução do tamanho do incremento para níveis próximos de 1×10^{-7} dificulta enormemente a realização destas simulações. A título de exemplo a simulação com o modelo linear elástico requer aproximadamente 36 horas de computação.

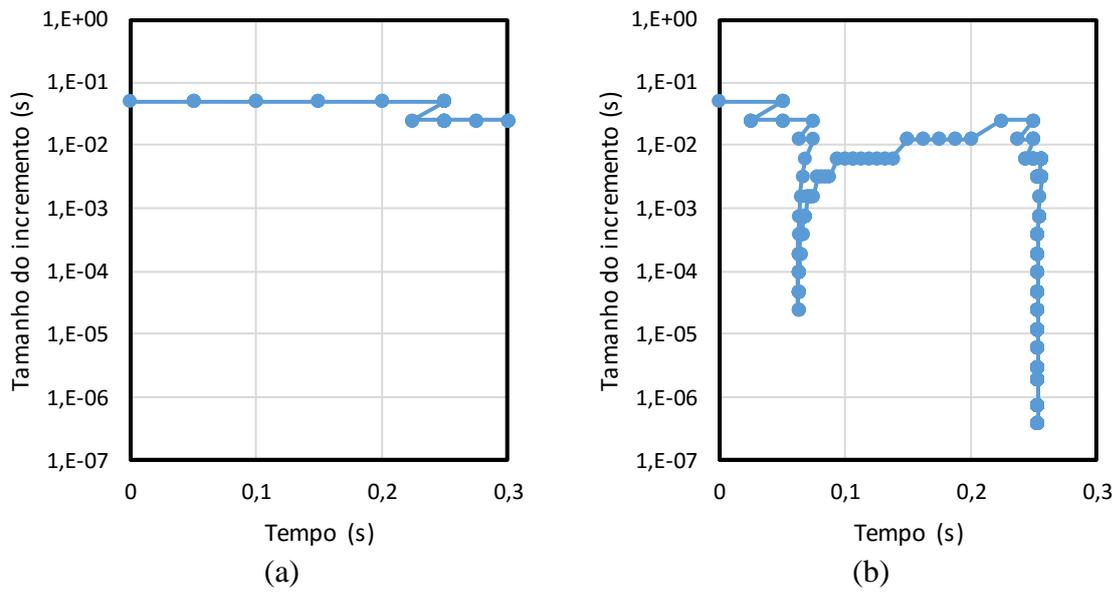


Figura 4.30. Evolução do incremento de tempo ao longo do ensaio dinâmico para o quadro com: (a) material linear elástico e (b) material elastoplástico (6061-T6).

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A simulação numérica é comumente promovida como uma ferramenta de fácil utilização, em particular quando se recorre a programas comerciais com um ambiente gráfico amigável para o utilizador. No entanto, a realização deste trabalho permitiu identificar um conjunto de dificuldades. Estas surgem ainda antes da modelação dos ensaios. A própria preparação dos ficheiros em ambiente CAD é uma tarefa morosa, inevitável sempre que a análise seja feita com base num ficheiro CAD do quadro em formato genérico (*standard* de CAD). Se for utilizado o mesmo *software* tanto no desenho do quadro como na modelação dos ensaios, a etapa de preparação do modelo será mais simples. Esta etapa de preparação é fundamental para gerar a malha no *software* de simulação numérica. Como no caso em análise não foi possível utilizar um ficheiro de CAD nativo, mesmo após a etapa de preparação, existem pequenos espaços entre as diversas superfícies do quadro, que obrigam a gerar malhas refinadas, de modo a garantir a obtenção de volumes. Estes problemas geométricos contribuem para aumentar o tempo de cálculo. A título de exemplo a etapa de geração da malha mais refinada, utilizada neste trabalho para o quadro, requereu aproximadamente 19 horas. Por outro lado, o recurso à geração automática da malha de elementos finitos parece uma alternativa eficiente, mas torna-se perigosa, em particular nas zonas potenciais de contacto. Assim, a utilização da geração automática de malha carece de um estudo mais rigoroso, incluindo a sua combinação com opções introduzidas pelo utilizador, de modo a minimizar potenciais problemas. A interpretação da norma e a sua implementação na construção dos modelos que replicam as condições dos ensaios, em conjunto com a etapa de preparação do modelo do quadro foram as fases mais morosas na realização deste trabalho. De notar que a implementação das condições de ensaio nos modelos exigiu a realização de simulações numéricas, de modo a validar as opções adotadas.

A realização das simulações numéricas requer também recursos de *hardware* informático algo avançados, consequência do elevado número de nós/elementos, do facto de o material apresentar comportamento elastoplástico e dos ensaios envolverem grandes deformações. Para além disso, associada à não linearidade geométrica e de comportamento do material, surge ainda a não linearidade associada ao contacto, que também contribui para

dificultar a resolução do problema. Assim, é necessário garantir uma memória RAM que permita alocar o problema, mas também um computador com capacidade de cálculo para permitir a rápida resolução do sistema de equações, em cada incremento de tempo. Por último, é também necessário garantir espaço disponível para o armazenamento da enorme quantidade de informação gerada. Todos estes fatores limitaram um estudo mais cuidadoso de sensibilidade de malha, bem como da análise do parâmetro numérico tamanho do incremento. De facto, nas simulações numéricas realizadas foi possível observar a variação deste parâmetro de forma automática, quando o valor predefinido não permite a convergência. A otimização deste parâmetro em função das características do ensaio pode conduzir à redução do tempo de cálculo, mas este estudo deverá ser realizado com modelos mais simples. Assim, no âmbito deste trabalho e tendo em conta a falta de experiência na utilização do *Autodesk Simulation Mechanical*, a maior dificuldade esteve associada aos enormes tempos de cálculo, em particular para o ensaio de impacto de quadro em queda. De facto, importa realçar que a realização da simulação dos ensaios de impacto será sempre mais morosa do que a realização do ensaio experimental. O desafio é encontrar um compromisso entre os parâmetros numéricos que conduzam a tempos de cálculo passíveis de serem utilizados na fase de conceção dos modelos.

Este trabalho deve ser encarado como uma primeira abordagem a este tema e constitui uma motivação para um estudo mais aprofundado dos diversos aspetos que envolvem a realização numérica dos ensaios. Os resultados obtidos para os ensaios de impacto são coerentes com o expectável. No entanto, não foi possível realizar uma validação por comparação com resultados experimentais, uma vez que o quadro ainda não foi sujeito a testes. A disponibilização de resultados experimentais permitirá realizar uma análise pormenorizada à influência dos parâmetros utilizados no *software* de análise de elementos finitos, de modo a garantir resultados mais próximos dos valores experimentais.

Os modelos elaborados no âmbito deste trabalho constituem uma base para a:

- Análise de sensibilidade a parâmetros numéricos em particular dimensão dos elementos finitos e do incremento de tempo. O acesso a resultados experimentais dos ensaios permitirá uma melhor interpretação da influência das simplificações adotadas nos modelos;
- Análise da influência do modelo constitutivo, bem como dos parâmetros utilizados, para a liga de alumínio 6061. O modelo e os parâmetros adotados neste trabalho basearam-se na informação disponível na base de dados do *Autodesk Simulation*

Mechanical. A realização de ensaios mecânicos de caracterização dos materiais utilizados permitirá uma melhor definição do comportamento mecânico, incluindo a sensibilidade à velocidade de deformação;

- Análise das ligações soldadas do quadro, uma vez que são, geralmente, as zonas críticas. A sua correta definição geométrica e caracterização mecânica permitirá incorporar mais detalhes na análise, com potenciais vantagens na precisão dos resultados. No entanto, este estudo terá de ser realizado de forma cuidada, uma vez que a incorporação de mais detalhes geométricos contribuirá para o aumento da complexidade do modelo.

- Análise dos ensaios de fadiga com recurso ao módulo *Fatigue Wizard*. Este módulo permite realizar a análise com base na tensão nominal, na deformação ou no coeficiente de segurança à fadiga. Importa realçar que a exploração deste módulo é um processo que, só de si, pode constituir um tema de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GrabCAD, Acedido pela última vez a 6 de Junho de 2016, em <https://grabcad.com/library/bicycle-frame-5>.
- [2] “DIN 79100: Bicycles; terms, safety requirements, tests”, Deutsches Institut für Normung. em Alemão, 1984.
- [3] “ISO 4210: Cycles — Safety requirements for bicycles”, International Organization for Standardization, 2015.
- [4] Autodesk, Acedido pela última vez a 10 de Julho de 2016, em: <http://www.autodesk.com/products>.
- [5] Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A. e Bazilevs, Y. (2005), “Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194, 4135-4195.
- [6] Singletrack, Acedido pela última vez a 28 de Junho de 2016, em: <http://singletrackworld.com/forum/topic/measuring-axle-to-crown-height>.
- [7] PinkBike, Acedido pela última vez a 11 de Junho de 2016, em: <http://www.pinkbike.com/forum/listcomments/?threadid=78006>.
- [8] Wiggle.co.uk, Acedido pela última vez a 14 de Junho de 2016, em: <http://guides.wiggle.co.uk/mountain-bike-tyres-buying-guide>.
- [9] BikeCalc.com, Acedido pela última vez a 14 de Junho de 2016, em: http://www.bikecalc.com/wheel_size_math.
- [10] Neto, D.M. (2014), “Numerical Simulation of frictional contact problems using Nagata patches in surface smoothing”, Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra.

